



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

2
ZEF

FACULTAD DE INGENIERIA

**CEMENTACIONES FORZADAS EN
POZOS PETROLEROS**

**TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A I
JOSE LUIS ANZURES MAZA**



MEXICO, D. F.

1995

FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-067

SR. JOSE LUIS ANZURES MAZA
Presente.

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Nehemias Herrera Patrón, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de ingeniero petrolero:

CEMENTACIONES FORZADAS EN POZOS PETROLEROS

	INTRODUCCION
I	GENERALIDADES
II	EQUIPO Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN CEMENTACIONES FORZADAS
III	DESCRIPCION DE METODOS Y TECNICAS
IV	DISEÑO DE CEMENTO
V	PROGRAMA DE CALCULO DE UNA CEMENTACION FORZADA
	CONCLUSIONES
	BIBLIOGRAFIA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Ciudad Universitaria, a 27 de septiembre de 1993.
EL DIRECTOR


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS*EGLM*ggg*

200 AÑOS DE ENSEÑANZA DE LA INGENIERIA EN MEXICO



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

TEMA DE TESIS:

CEMENTACIONES FORZADAS EN POZOS PETROLEROS

REALIZADA POR :

José Luis Anzures Maza

8334659-B

Firmas de conformidad del jurado:

PRESIDENTE: Ing. Salvador Macías Herrera

VOCAL: Ing. Nehemías Herrera Patrón

SECRETARIO: M.I. Rafael Rodríguez Nieto

1º Suplente Ing. Manuel Villamar Viguera

2º Suplente Ing. Walter Friedeberg Merzbach

Cd. Universitaria. Abril de 1995

AGRADECIMIENTOS

A mi padre:

PORFIRIO ANZURES VAZQUEZ +

En tu memoria y con profunda admiración dedico este trabajo, aunque el destino no me dio la oportunidad de demostrarte lo que muchas veces platicamos juntos. Quiero expresar que siempre estarás vivo en mi corazón y a cada momento, eres la luz que ilumina mi futuro.

La herencia mas importante es sentirme parte de ti y haber impulsado con tu ejemplo a ser siempre el mejor. te agradezco por ayudarme a concluir esta difícil etapa, donde quiera que estés.

A mi madre:

MARIA DEL. CARMEN MAZA MARINA

Con mucho amor, para ti que eres lo mas especial que tengo, gracias por demostrarme siempre ternura, respeto y confianza, te prometo que le pondré todas la ganas para que nuestras esperanzas se lleven a cabo.

A mi hermano:

GUILLERMO A. ANZURES MAZA

Gracias por creer y ser el valuarte en mi desarrollo como estudiante, por tomar el timón de la familia y enseñarme que no hay nada difícil en la vida, espero tener la oportunidad de demostrarte lo que significas para mí.

A mi hermana:

MARIA DEL CARMEN ANZURES MAZA

Con cariño por apoyarme con tu carácter en momentos difíciles de soledad, tengo mucha confianza en ti, espero que ésto te sirva como ejemplo para que siempre te superes como ahora.

A mi tío:

ROMEO ANZURES VAZQUEZ

Con respeto, por el apoyo incondicional y haberme hecho sentir con el compromiso de responderte como un hijo, comparto contigo éste primer éxito.

A la familia:

JARAMILLO ANZURES

Gracias por la oportunidad de compartir su hogar y sentirme apoyado por la unión de su familia, son recuerdos y experiencias muy especiales.

A mis abuelitos:

LUPE Y MARY +

LUIS Y DELI

Por todos los momentos inolvidables de amor y paternalismo, gracias por compartir sus experiencias.

Al ing. NEHEMIAS HERRERA PATRON

Por la paciencia y apoyo recibido a lo largo de la realización de éste trabajo.

A mis profesores:

Gracias por compartir sus conocimientos.

A mis amigos y compañeros:

Por compartir momentos de superación.

A la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO

CEMENTACIONES FORZADAS EN POZOS PETROLEROS

CONTENIDO

	PAGINAS
INTRODUCCION	1
CAPITULOS	
I. GENERALIDADES	3
I.1 Definición	3
I.2 Objetivos	3
I.3 Factores que intervienen	5
I.4 Recursos disponibles	6
I.5 Conceptos y bases	9
I.5.1 Presión de fractura	12
I.5.2 Gradiente de fractura	15
I.5.3 Presión de cementación de fondo	16
I.5.4 Presión de inyección superficial	17
I.5.5 Presión máxima	17
I.5.6 Presión final	18
I.5.7 Presión hidrostática	18
I.5.8 Presión de cierre instantáneo	19
I.6 Prueba de admisión	19

II. EQUIPO Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN CEMENTACIONES FORZADAS	21
II.1 Unidad de alta presión	25
II.2 Tolvas o trompos de cemento	28
II.3 Conexiones superficiales	28
II.4 Herramientas recuperables	31
II.4.1 Cementador recuperable "RTTS"	31
II.4.2 Cementador recuperable modelo C-1	32
II.4.3 Cementador recuperable "RM"	32
II.5 Retenedor de cemento permanente Mercury "K"	35
III. DESCRIPCION DE METODOS Y TECNICAS	38
III.1 Método de Branden-Head	38
III.2 Método utilizando herramienta retenedora o cementadora	42
III.3 Técnica de cementación a alta presión	47
III.4 Técnica de cementación a baja presión	53
III.5 Tipos de bombeo	58
III.5.1 Bombeo lento	59
III.5.2 Bombeo intermitente	59
III.5.3 Bombeo rápido	60
IV. DISEÑO DE CEMENTO	61
IV.1 Criterios de diseño	62
IV.2 Manufactura del cemento	70
IV.3 Clasificación de los cementos	72
IV.4 Aditivos para cemento	73

IV.4.1	Catalizadores de cemento	76
IV.4.2	Aditivos ligeros	76
IV.4.3	Aditivos para trabajo pesado	77
IV.4.4	Retardadores de cemento	79
IV.4.5	Aditivos para controlar zonas de pérdida de circulación	80
IV.4.6	Aditivos de control de filtrado para cemento	80
IV.4.7	Reductores de fracción	82
IV.4.8	Polímeros	84
IV.4.9	Aditivos especiales para el cemento	84
IV.5	Pruebas de laboratorio	87
IV.5.1	Determinación del contenido de agua	88
IV.5.2	Densidad de la lechada	89
IV.5.3	Pruebas de resistencia	89
IV.5.4	Tiempo de bombeabilidad	90
IV.5.5	Determinación del filtrado	94
IV.5.6	Permeabilidad	95
IV.5.7	Propiedades reológicas	96
V.	PROGRAMA DE CALCULO DE UNA CEMENTACION FORZADA	98
V.1	Objetivo de la operación	98
V.2	Intervalo a cementar	98
V.3	Datos del pozo	98
V.4	Cálculo de las presiones máximas permisibles	99
V.5	Cálculo de volúmenes	104
V.6	Programa operativo	105
	CONCLUSIONES	
	BIBLIOGRAFIA	

INTRODUCCION

Actualmente la industria petrolera en México ha alcanzado enormes adelantos, creando durante más de cincuenta años de existencia una infraestructura sofisticada que asegura un desarrollo tecnológico de primer nivel. Debido a su importancia económica dentro del país, es un potencial para el desarrollo de México.

A través de estos años recorridos, las cifras de producción primaria y de los derivados petrolíferos han alcanzado las magnitudes indispensables a la satisfacción del consumo interno y la existencia de excedentes exportables, necesarios para la captación de divisas.

Estos adelantos han permitido esencialmente la perforación de pozos cada vez más profundos aunados a las altas presiones y temperaturas y a la presencia de fluidos contaminantes y corrosivos.

Durante la vida productiva de un pozo se llevan a cabo operaciones destinadas a controlar o mejorar la producción de éste, para ello es necesario nuevas técnicas para un mejor desarrollo.

Dentro de las operaciones destinadas a mejorar la vida productiva de un pozo están las cementaciones forzadas cuyas técnicas y métodos de operación se desarrollan en el presente trabajo y que son no sólo planteamientos técnicos, sino experiencias de campo, llevadas a cabo por el departamento de ingeniería petrolera a nivel sistema.

Uno de los factores más importantes para la selección, programación, diseño y éxito de las operaciones de cementación forzada es el eficiente manejo de los recursos humanos y materiales, dando como consecuencia beneficios económicos.

Las empresas petroleras realizan frecuentemente en los pozos, la cementación de tuberías de revestimiento, utilizando compañías de servicios para estas operaciones, que en la ocasión inicial se denomina cementación primaria.

Aparte de la lechada de cemento empleada, también se usan otros tipos de fluidos conocidos como lavadores o espaciadores.

A pesar de las precauciones para minimizar los problemas en las cementaciones de las tuberías, éstas pueden resultar sin un aislamiento adecuado, por lo que se requerirá recementarlas. También hay ocasiones que intencionalmente habrá que aislar intervalos, ya sean productores o por producir. A este tipo de trabajo se les llama cementaciones forzadas.

En las operaciones satisfactorias de ademe de los pozos, se deben utilizar productos que cumplan con la finalidad fijada, para que la adherencia del cemento desplazado y forzado por las perforaciones demuestre buena consistencia.

El objetivo principal de este trabajo, está enfocado básicamente a la descripción de cada una de las operaciones, así como a las opciones o alternativas que en un momento dado debe tomar el ingeniero petrolero.

CAPITULO I

GENERALIDADES

I.1 DEFINICION.

Cementación forzada es un proceso que consiste en aplicar presión hidráulica para forzar una lechada de cemento hacia la formación o canales en la cementación primaria, a través de las perforaciones efectuadas en la tubería de revestimiento o contra una zona porosa. Es el tipo de cementación más común en la etapa de reparación en un pozo.

Generalmente, la cementación forzada requiere presiones que varían en un rango muy amplio y se efectúa mediante el uso de diferentes herramientas, las cuales se colocan hacia arriba del tramo donde se necesita que el cemento sea forzado.

Además, en la operación satisfactoria de cementación forzada, se usan fluidos para limpiar y abrir las perforaciones en el área en que va a ser forzado y desplazado el cemento.

I.2 OBJETIVOS.

Hoy en día el uso más común de cementación forzada es para aislar una zona productora de hidrocarburos de aquellas que producen otros fluidos.

Se ha demostrado también que se pueden hacer cementaciones forzadas sin fracturar la formación, controlando que las presiones de inyección sean bajas; sin embargo, el objetivo de una cementación forzada es colocar el cemento en los puntos correctos.

La cementación forzada se puede utilizar también para:

- a. Controlar la relación gas-aceite.
- b. Controlar el agua excesiva.
- c. Reparar fugas en la T.R.
- d. Sellar zonas débiles o con pérdidas de circulación.
- e. Proteger contra la migración de fluidos dentro de una zona productora.
- f. Aislar zonas en terminación de pozos.
- g. Corregir un trabajo de cementación primaria defectuosa.
- h. Prevenir la migración de fluidos de zonas o pozos abandonados.

El bloqueo por cemento, arriba y abajo de una zona a producir (aislamiento) y la reparación de una cementación primaria defectuosa se evitarían por medio de prácticas de ademe satisfactorias. Las razones más comunes para aplicar una cementación forzada son el abandono, el control de gas y la entrada de agua en un pozo.

La entrada de fluidos indeseables es inevitable, debido a que el espesor de la zona de aceite disminuye con el agotamiento del yacimiento; el gas y el agua se conifican. Aparte del abandono del pozo, el control de entrada de gas y el agua al mismo, es probablemente la razón más común para hacer una cementación forzada. Manteniendo el daño a la formación al mínimo o estableciendo una reparación al pozo, se minimiza esta entrada de fluidos y se disminuye la tendencia a la conificación.

I.3 FACTORES QUE INTERVIENEN.

Existen algunos parámetros propios de una zona determinada, que de una u otra forma ayudan a determinar las condiciones en que se desarrollará un trabajo de cementación forzada, estos factores son:

- Historia del pozo.
- Zonas de pérdida pozo arriba o pozo abajo, derrumbes.
- Resultados de los registros de adherencia del cemento.
- Localización de contactos originales y actuales.
- Diseño de tuberías de revestimiento:
 - Peso, tipo, resistencia al colapso/ruptura.
- Daño potencial a la formación.
- Tipos de rocas:
 - Permeabilidad, porosidad primaria, porosidad secundaria, fracturas y humectabilidad.
- Temperatura de fondo (estática y dinámica).
- Presiones de fondo:
 - Presión estática, presión de sobrecarga, presión de fractura.
- Gradiente de fractura y orientación de la fractura.

Todos los factores mencionados anteriormente deben ser considerados al planear una cementación forzada, sin considerar las razones para tomar una acción como remedio. La cementación forzada es uno de los tipos de reparación más complejos y depende de un buen planteamiento anterior a la operación. Si no se comprenden perfectamente bien las condiciones en que se desarrollará la operación, esta podrá fallar.

I.4 RECURSOS DISPONIBLES.

Cuando se efectúa una cementación forzada, se pueden usar uno o varios recursos, tales como:

- Registros de inspección de tubería de revestimiento.
- Registro de adherencia del cemento.
- Escariadores, rimas, trompos.
- Sarta de tubería de prueba.
- Máximo diámetro interior posible de la sarta de reparación.
- Diseño y selección de la lechada cementante:
 Baja pérdida de agua, baja densidad, alta temperatura, etc.
- Tipos de herramienta (permanentes, recuperables).
- Fluidos de servicios de limpieza.
- Disparos.

Uno de los recursos principales disponibles es el cemento con baja pérdida de agua (BPA). Estas lechadas de cemento tienen grandes ventajas debido a que existe poco cambio en la relación agua/cemento. Esto origina tiempos de espesamiento uniforme y una lechada que permanece fluida mientras se bombea, lo que a su vez origina:

- Menor presión de desplazamiento.
- Menores problemas por pérdida de circulación.

Así mismo, por el pequeño cambio en la relación agua/cemento, los volúmenes de llenado y desplazamientos son más confiables.

Finalmente el daño potencial a la fractura y el peligro de fraguado instantáneo, se reducen al mínimo. A medida que las restricciones en la presión de fondo lo permiten (presiones estáticas y de fractura), los cementos de baja pérdida de agua permitirán cementaciones forzadas en una sola etapa y con mayores volúmenes.

El uso del cemento sin aditivos tiene las siguientes restricciones:

- La pérdida de agua de la lechada ocasiona un aumento en la viscosidad del cemento, lo que crea presiones mayores de desplazamiento.
- En casos extremos, la pérdida de agua causará un fraguado instantáneo, originando falsas presiones de cementación.

La Tabla 1, enlista algunos aditivos de baja pérdida de agua con sus propiedades, objetivos y concentraciones recomendadas (por ciento en peso de cemento).

Finalmente el daño potencial a la fractura y el peligro de fraguado instantáneo, se reducen al mínimo. A medida que las restricciones en la presión de fondo lo permiten (presiones estáticas y de fractura), los cementos de baja pérdida de agua permitirán cementaciones forzadas en una sola etapa y con mayores volúmenes.

El uso del cemento sin aditivos tiene las siguientes restricciones:

- La pérdida de agua de la lechada ocasiona un aumento en la viscosidad del cemento, lo que crea presiones mayores de desplazamiento.

- En casos extremos, la pérdida de agua causará un fraguado instantáneo, originando falsas presiones de cementación.

La Tabla 1, enlista algunos aditivos de baja pérdida de agua con sus propiedades, objetivos y concentraciones recomendadas (por ciento en peso de cemento).

TABLA 1. ADITIVOS DE BAJA PERDIDA DE AGUA

OBJETIVO	PROPIEDAD	ADITIVOS	% EN PESO DE CEMENTO
Formar micelas con todos los cementos API.	Controlan el flujo de agua y retardan la deshidratación.	Polímeros orgánicos de la celulosa. Carboximetil-hidroxietyl.	0.5 a 1.5 0.3 a 1.0
Formar micelas hoja y mejorar la distribución del tamaño de partícula con todos los cementos API.	Atrapan agua en la lechada y controlan la deshidratación.	Polímeros orgánicos dispersantes. Cemento-bentonita con dispersante (API clase A, G ó II solamente).	0.5 a 1.25 12 a 16 gal. 0.7 a 1.0 dispersante

La Figura 1, representa las ventajas de usar un cemento con baja pérdida de agua.

Si la pérdida de agua es demasiado alta, la velocidad de filtración bajo presión, deshidrata el cemento tan rápido como para que el enjarre pueda cubrir completamente la tubería de revestimiento e impedir que la lechada penetre en las perforaciones más bajas o, cuando se comprime en un canal, el enjarre puede bloquear su extremo e impedir que el canal se llene.

Bajas velocidades de filtración forman solamente delgados enjarres (50 cc/30 min). Por definición API, una alta pérdida de fluidos es aquella entre 600 y 2500 cc/30 min y una baja pérdida oscila entre 25 y 100 cc/30 min.

1.5 CONCEPTOS Y BASES.

En el campo existen tres teorías predominantes sobre cementaciones forzadas, que pueden contribuir a procedimientos y aplicaciones inadecuados, debido a su interpretación.

A) Todo el cemento entra en la formación: Este falso concepto guía para que la cantidad de cemento bombeada detrás de la tubería y el valor de la presión aplicada, se tomen en consideración, cuando realmente estos factores afectan poco los resultados de la cementación. La verdad es que no todo el filtrado de cemento entra en la formación.

B) Al inyectar únicamente lodo, la ruptura abre automáticamente todas las perforaciones. En realidad, es raro encontrar todas las perforaciones abiertas y que reciban el fluido. Para alcanzar esto se requiere un esfuerzo considerable (Figura 2).

COMPORTAMIENTO DE LA LECHADA DE CEMENTO
EN UNA CEMENTACION FORZADA

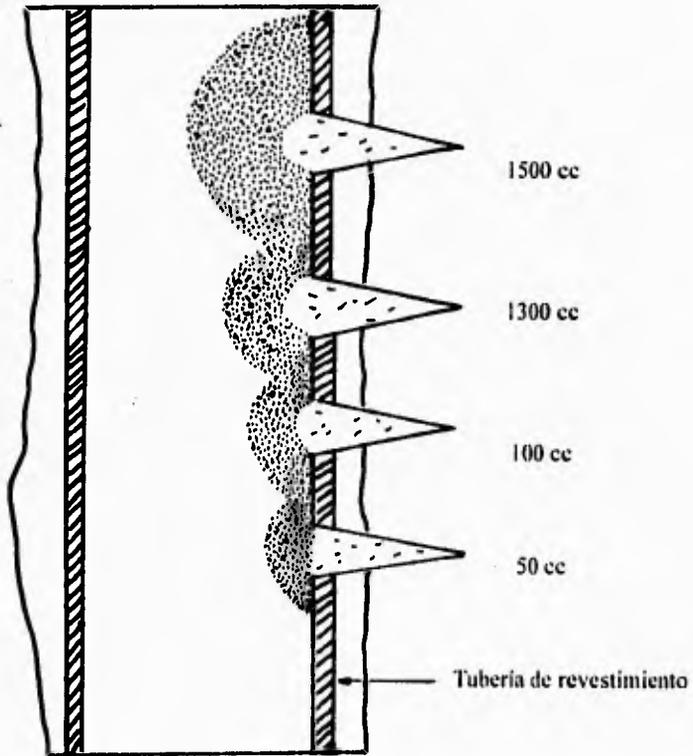


FIGURA 1. Efecto de la pérdida de agua en la hidratación del cemento

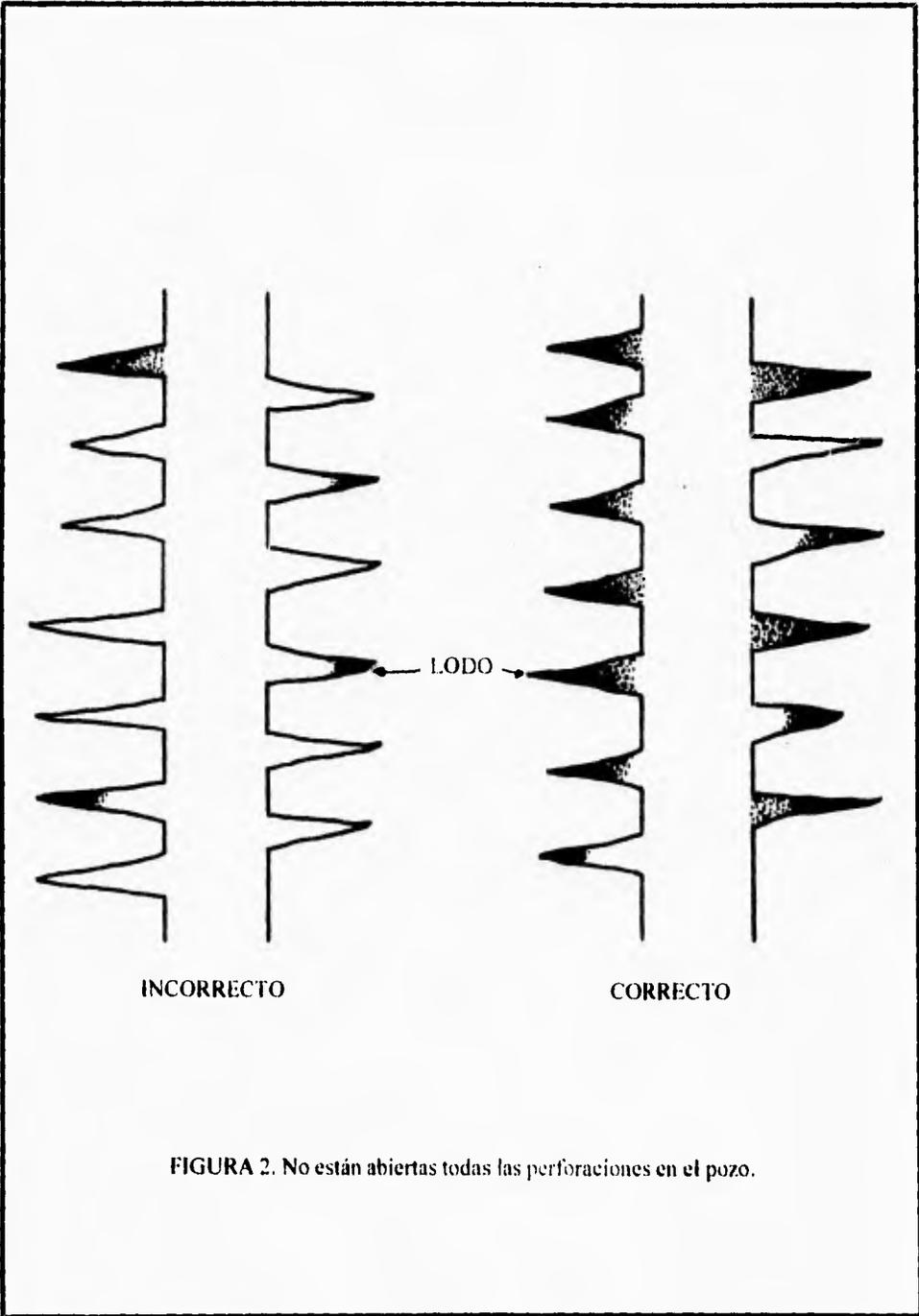


FIGURA 2. No están abiertas todas las perforaciones en el pozo.

C) Se forma un solo sello o cuña horizontal de cemento alrededor del agujero. Las indicaciones son, debido a que todo el cemento no puede entrar en la formación, el filtrado se separa de las perforaciones. Cuando la formación se fractura, la mezcla de cemento puede entrar en una serie de cuñas irregulares (Figura 3).

Como anteriormente se dijo, planear la cementación forzada en una operación, es un paso muy importante. Se deben estudiar las condiciones del pozo y establecer los objetivos cuidadosamente, ya que la cementación forzada puede resultar complicada y costosa.

1.5.1 PRESION DE FRACTURA.

Presión de fractura es la fuerza por unidad de área necesaria para vencer la presión de formación y la resistencia de la roca. El grado de resistencia que ofrece una formación a su fracturamiento depende de la solidez o cohesión de la roca y de los esfuerzos de compresión a los que está sometida.

La densidad es una propiedad muy importante para el fluido de control y se deben considerar varios parámetros para seleccionarlo, como son la profundidad y el gradiente de fractura, los cuales se toman en cuenta para determinar la presión hidrostática que ejercerá el control sobre la presión de formación.

El gradiente de fractura describe el rompimiento de la formación en función de un gradiente de fluido. Para causar una fractura, la presión del fluido deberá ser mayor que la presión de formación (P) y el esfuerzo de la matriz de la roca (M).

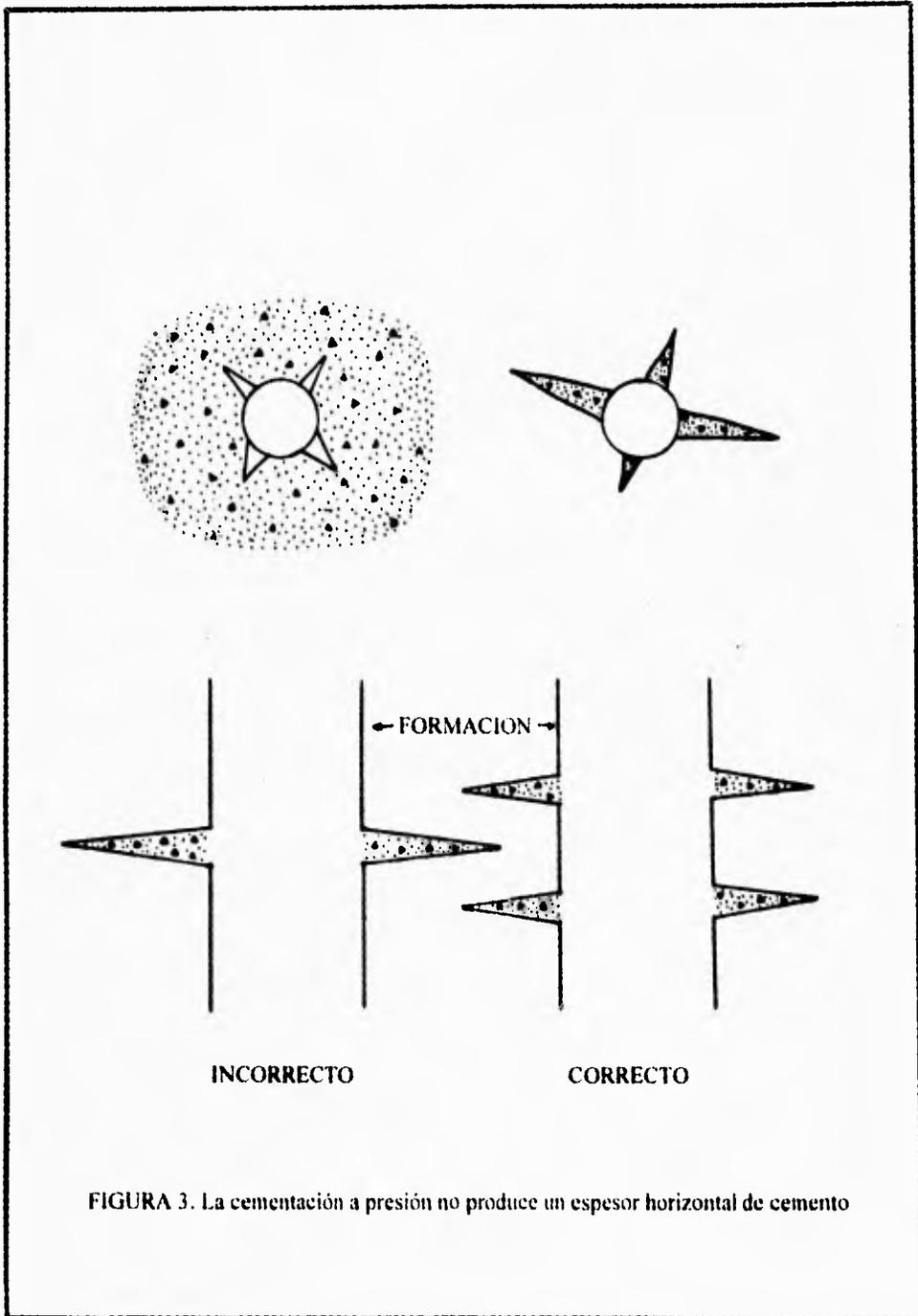


FIGURA 3. La cementación a presión no produce un espesor horizontal de cemento

En una dirección vertical, el esfuerzo de la matriz de la roca se describe como la diferencia entre el peso de la sobrecarga (S) y la presión de formación (P), o sea (S - P), el peso de sobrecarga se distribuye también como un esfuerzo horizontal, el cual es menor que el vertical. La relación de esfuerzos (K), es la relación de los esfuerzos horizontal y vertical.

La presión sobre la formación en un pozo causará una fractura en la dirección del esfuerzo menos resistente. En formaciones relacionadas tectónicamente, el menor esfuerzo de la matriz de la roca es horizontal y se describe por la ecuación:

$$M = (S - P) K \quad (1)$$

Donde:

M = Esfuerzo de la matriz de la roca.

S = Peso de la sobrecarga.

P = Presión de formación.

K = Relación de esfuerzos.

Finalmente la presión de fractura o gradiente de una formación, descrito en términos de la presión de formación y el menor esfuerzo de la matriz de la roca, se convierte en la ecuación:

$$P. F. = P + (S - P) \quad (2)$$

La ecuación anterior describe la presión de fracturamiento de la formación en términos de presión, gradientes o densidades equivalentes, siempre que sus unidades sean consistentes.

La presión de fractura puede estimarse en el campo mediante la siguiente ecuación:

$$P. F. = G. F. \cdot D \quad (3)$$

Donde:

P. F. = Presión de fractura (lb/pg²).

G. F. = Gradiente de fractura (lb/pg²/pie).

D. = Profundidad (pies).

1.5.2 GRADIENTE DE FRACTURA.

El gradiente de fractura, es el cociente presión/profundidad que define a la manera en que varía la presión de fracturamiento, al variar la profundidad.

A partir de datos obtenidos de algunas cementaciones a presión donde se haya efectuado fracturamiento de la formación, se puede estimar en el campo el gradiente de fractura, adicionando la presión de superficie observada al suspender instantáneamente el bombeo, presión de cierre instantánea P_{ci} , con la presión hidrostática debido al fluido en el pozo P_h , dividiendo entre la profundidad de la formación D , es decir:

$$G.F. = (P_{ci} + P_h) / D \quad (4)$$

A través de experiencias de campo y laboratorio se ha encontrado que la presión que soporta una roca sin que se fracture, es función principalmente de su resistencia y de los esfuerzos a los que se encuentra sometida en el subsuelo.

La resistencia que ofrece la formación por sí misma, raras veces asciende a más de 250 lb/pg² y se ha observado que las formaciones se fracturan a presiones inferiores a la presión de sobrecarga.

1.5.3. PRESION DE CEMENTACION DE FONDO.

La presión de cementación de fondo es la presión ejercida en la formación durante una operación de cementación forzada. Esta es la presión en superficie, más la presión hidrostática de los fluidos en el pozo menos las pérdidas por fricción.

En forma de ecuación se expresa:

$$P_{tr} = P_{wh} + P_h - P_f \quad (5)$$

Donde:

P_{tr} = Presión de cementación de fondo (lb/pg²).

P_{wh} = Presión de la cabeza del pozo o presión superficial aplicada por las bombas (lb/pg²).

P_h = Presión hidrostática (lb/pg²).

P_f = Pérdidas por fricción o caída de presión (lb/pg²).

En cementaciones forzadas, las pérdidas por fricción son relativamente bajas y generalmente se desprecia en los cálculos.

La ecuación anterior se convierte en:

$$P_{tr} = P_{wh} + P_h \quad (6)$$

La resistencia que ofrece la formación por sí misma, raras veces asciende a más de 250 lb/pg² y se ha observado que las formaciones se fracturan a presiones inferiores a la presión de sobrecarga.

1.5.3. PRESION DE CEMENTACION DE FONDO.

La presión de cementación de fondo es la presión ejercida en la formación durante una operación de cementación forzada. Esta es la presión en superficie, más la presión hidrostática de los fluidos en el pozo menos las pérdidas por fricción.

En forma de ecuación se expresa:

$$P_{tr} = P_{wh} + P_h - P_f \quad (5)$$

Donde:

P_{tr} = Presión de cementación de fondo (lb/pg²).

P_{wh} = Presión de la cabeza del pozo o presión superficial aplicada por las bombas (lb/pg²).

P_h = Presión hidrostática (lb/pg²).

P_f = Pérdidas por fricción o caída de presión (lb/pg²).

En cementaciones forzadas, las pérdidas por fricción son relativamente bajas y generalmente se desprecia en los cálculos.

La ecuación anterior se convierte en:

$$P_{tr} = P_{wh} + P_h \quad (6)$$

La presión de fondo debe ser usada como el criterio para regir la operación. Debido a que el fracturamiento es indeseable en algunos casos, la presión máxima de trabajo en el fondo, debe ser menor que la presión de fractura.

Si el exceso de cemento debe ser regresado, la presión mínima de trabajo en el fondo debe ser de 300 a 500 lb/pg², mayor que la presión de circulación en el fondo requerida para la circulación inversa.

Cuando la presión de cementación de fondo (Ptr) excede a la presión de formación (P) en algunas centenas de lb/pg², se formará un enjarre de cemento en las perforaciones por deshidratación. Las altas presiones de trabajo no aumentan la posibilidad del éxito sino incrementan la probabilidad de fracturar la formación.

1.5.4. PRESION DE INYECCION SUPERFICIAL.

La presión de inyección superficial se observa cuando la formación, después de romper empieza a admitir fluidos y es la presión de bombeo registrada en la superficie, mediante la cual se inyecta el cemento a la formación.

La presión de inyección es el promedio de las observadas durante la inyección de la lechada, antes de alcanzar la presión máxima.

1.5.5. PRESION MAXIMA.

La presión máxima se registra en la superficie al alcanzar la mayor lectura de presión en el manómetro, al finalizar la inyección de la lechada de cemento dentro de la formación.

Es importante pensar como está reaccionando el pozo. La actividad en el trabajo deberá regirse por las presiones superficiales, considerando siempre lo que está sucediendo en el fondo del pozo.

La presión máxima debe pre-establecerse por medio de un estudio que tome en cuenta las condiciones particulares del pozo, recordando siempre que el principal objetivo es el de construir una capa de cemento frente al intervalo y no el de alcanzar altas presiones.

I.5.6. PRESION FINAL.

La presión final equivale en algunos casos a la presión máxima alcanzada y en otros, a la presión instantánea de cierre. Esta se registra en la superficie al estabilizarse el sistema una vez que se ha cesado de bombear totalmente la lechada.

I.5.7. PRESION HIDROSTATICA.

La presión hidrostática es la ejercida por una columna de un fluido a una profundidad vertical dada y actúa de igual forma en todas direcciones, de otra manera:

$$Ph = D \cdot \rho_f / 10 \quad (7)$$

Donde:

Ph = Presión hidrostática (Kg/cm²).

D = Profundidad (m).

ρ_f = Densidad del fluido (gr/cm²).

1.5.8. PRESION DE CIERRE INSTANTANEO.

La presión de cierre instantáneo es la registrada en un manómetro en el momento preciso de parar la inyección de cualquier fluido.

1.6. PRUEBA DE ADMISION.

Se le llama prueba de admisión a la operación de aplicar presión hidráulica a la formación para establecer un gasto determinado. La presión de admisión variará de acuerdo a las diferentes áreas o campos de trabajo, ya que en cada campo se presentan columnas geológicas de diversos tipos de rocas.

Para llevar a cabo una prueba de admisión generalmente se usa una herramienta cementadora recuperable (RTTS), la cual una vez anclada permite ejercer la presión hidráulica en un punto o intervalo deseado.

Invariablemente los datos mas importantes que aporta una prueba de admisión son:

- Presión de admisión.
- Presión de inyección.
- Presión máxima de inyección.
- Presión final.
- Gasto.
- Volumen bombeado.
- Volumen regresado.

1.5.8. PRESION DE CIERRE INSTANTANEO.

La presión de cierre instantáneo es la registrada en un manómetro en el momento preciso de parar la inyección de cualquier fluido.

1.6. PRUEBA DE ADMISION.

Se le llama prueba de admisión a la operación de aplicar presión hidráulica a la formación para establecer un gasto determinado. La presión de admisión variará de acuerdo a las diferentes áreas o campos de trabajo, ya que en cada campo se presentan columnas geológicas de diversos tipos de rocas.

Para llevar a cabo una prueba de admisión generalmente se usa una herramienta cementadora recuperable (RTTS), la cual una vez anclada permite ejercer la presión hidráulica en un punto o intervalo deseado.

Invariablemente los datos mas importantes que aporta una prueba de admisión son:

- Presión de admisión.
- Presión de inyección.
- Presión máxima de inyección.
- Presión final.
- Gasto.
- Volumen bombeado.
- Volumen regresado.

PROCEDIMIENTO PARA EFECTUAR LA PRUEBA DE ADMISION.

1. Anclar el RTTS con peso y torsión aproximadamente 10 a 20 metros arriba del intervalo a probar.
2. Probar líneas superficiales.
3. Cerrar el preventor anular.
4. Probar efectibilidad de empaque.
5. Inyectar el fluido con que se va a efectuar la prueba de admisión midiéndolo en el depósito de la unidad de alta presión.
6. Anotar las presiones obtenidas así como los volúmenes manejados.
7. Medir el volumen regresado, en su caso.

CAPITULO II

EQUIPO Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN CEMENTACIONES FORZADAS

Para realizar una operación de cementación forzada, se pueden utilizar varios tipos de herramientas, la selección adecuada de cada una de ellas, será determinada por el trabajo a efectuar y generalmente se clasifican en cementadores recuperables y perforables.

Una herramienta recuperable actúa como empacador, sellando el espacio anular entre la tubería de trabajo (T. de producción) y la tubería de revestimiento. Esta puede ser levantada y empacada en cualquier punto deseado dentro del pozo y una vez realizada la operación fácilmente se recupera desde la superficie.

Las operaciones de cementación forzada que se efectúan con un empacador de cualquier tipo, son similares a las etapas discutidas cuando se usa un retenedor para una operación normal. El proceso de cementación forzada tiene un gran número de propiedades y sus correspondientes restricciones, además de algunos impedimentos en lo que se refiere a herramientas (Tabla 2).

Los empacadores perforables, también conocidos como tapones, se usan preferentemente cuando la operación se efectúa bajo las siguientes condiciones:

1. Pozos con bajo nivel de fluido (baja presión estática).
2. Zonas que requieren operaciones múltiples.
3. Operación para abandono.

**TABLA 2. PROPIEDADES Y RESTRICCIONES
DE LA CEMENTACION FORZADA**

PROPIEDADES	RESTRICCIONES
-------------	---------------

EN PERFORACIONES

Faseo de 90 °, 4 disparos / pie o más perforaciones limpias.	Faseo 0 ° ó 180 °, 1 disparo / pie o menos. Taponado (parcialmente).
--	--

EN CEMENTO

Baja pérdida de agua.	Cemento puro.
No contaminado buen control de viscosidad.	Contaminado alta viscosidad.
Baja presión de bombeo	La presión de desplazamiento excede a la de fractura.
Agua de filtrado compatible.	Agua de filtrado incompatible.
Espesamiento y retardación controlado.	Fraguado instantáneo.
Bajo gradiente, lb/gal/pie.	Alto gradiente, lb/gal/pie.

EN FLUIDO DE SERVICIO DEL POZO

Limpio compatible con sólidos o líquidos de la formación.	Sucio o incompatible con sólidos o líquidos de la formación.
---	--

TABLA 2. CONTINUACION.

PROPIEDADES	RESTRICCIONES
-------------	---------------

EN TUBERIA

Grado, peso, presión interna, presión de colapso, tensión	Baja capacidad vol / pie. Sarta de producción: parafina, varillas rotas, incrustaciones, corrosión. Vieja.
---	--

EN EMPACADORES

Múltiples operaciones con un solo recorrido. No se dejan herramientas en el agujero.	Se colocan solo dentro de las tuberías. Las fugas en la derivación producen pseudopresiones en el empacador. Dificultad en sacar la herramienta.
---	--

EN RETENEDORES

Impide el flujo regresivo de cemento.	La lechada de cemento se puede bombear fuera del retenedor.
---------------------------------------	---

Comúnmente el empaque perforable contiene una válvula de contrapresión, para evitar el regreso del cemento al término del desplazamiento y una válvula deslizable para cuando se desee mantener la presión en cualquiera de las direcciones.

La válvula soportará el peso de la columna hidrostática de fluido relevando al cemento de esta carga mientras que fragua. Se puede circular en inversa el exceso de cemento de la T.P. sin aplicar presión de circulación al área forzada debajo del empaque. La T.P. puede sacarse del pozo sin peligro de que quede atrapada.

Los cementadores recuperables también pueden dividirse en dos categorías:

Los que llevan la desviación concéntrica (by pass) para el fluido, constituida dentro del empacador y las que tienen la desviación separada.

Las desviaciones tienen tres propiedades:

1. Estando la desviación abierta comunica el agujero con la tubería, parte del fluido del pozo sube a través del empacador y sale hacia las puertas de la desviación.
2. Proporciona un sistema para igualar la presión alrededor del empacador.
3. A veces puede usarse para colocar fluido por encima del empacador.

La principal restricción del desviador es el potencial de fuga durante la operación, en cuyo caso el cemento en compresión entrará en la herramienta y no en el área deseada (Tabla 2).

II.1 UNIDAD DE ALTA PRESION.

La unidad de alta presión o unidad cementadora está constituida, generalmente, por dos bombas de alta potencia con su tablero de control, un mezclador y dos tanques de depósito, en los cuales se mide el agua utilizada durante la cementación (Figura 4).

Cualquiera de las bombas, succiona el agua necesaria de los depósitos y alimenta al mezclador para obtener la lechada de cemento y la otra bomba la envía al pozo.

En el mezclador se efectúa la mezcla agua-cemento. Su forma es semejante a la de un embudo con la parte ancha hacia arriba en la cual se vierte el cemento. Está previsto en la base de dos unidades que permiten conectar la línea de alimentación de agua y la línea de descarga de lechada. La primera línea une las bombas de la unidad cementadora y la segunda descarga la mezcla de cemento a un depósito, del que es succionada por la otra bomba y enviada al pozo.

Con el propósito de controlar la densidad de la lechada, ésta se determina periódicamente, tomando muestras y midiéndola manualmente con la balanza de lodos, o bien, se registra en forma continua, por medio de un dispositivo electrónico colocado en la línea de succión de la bomba que desplaza la lechada al pozo (Figura 5).

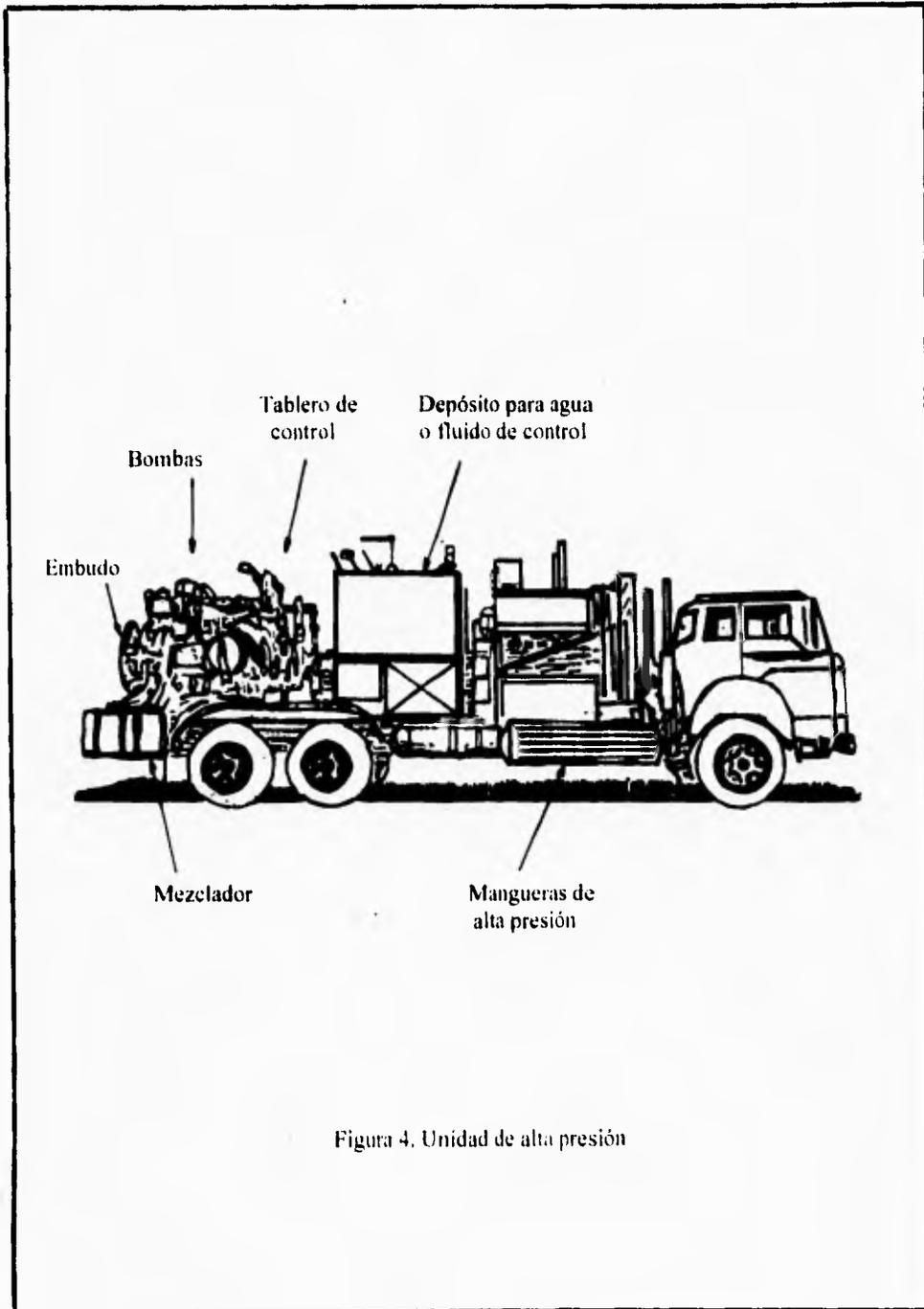


Figura 4. Unidad de alta presión

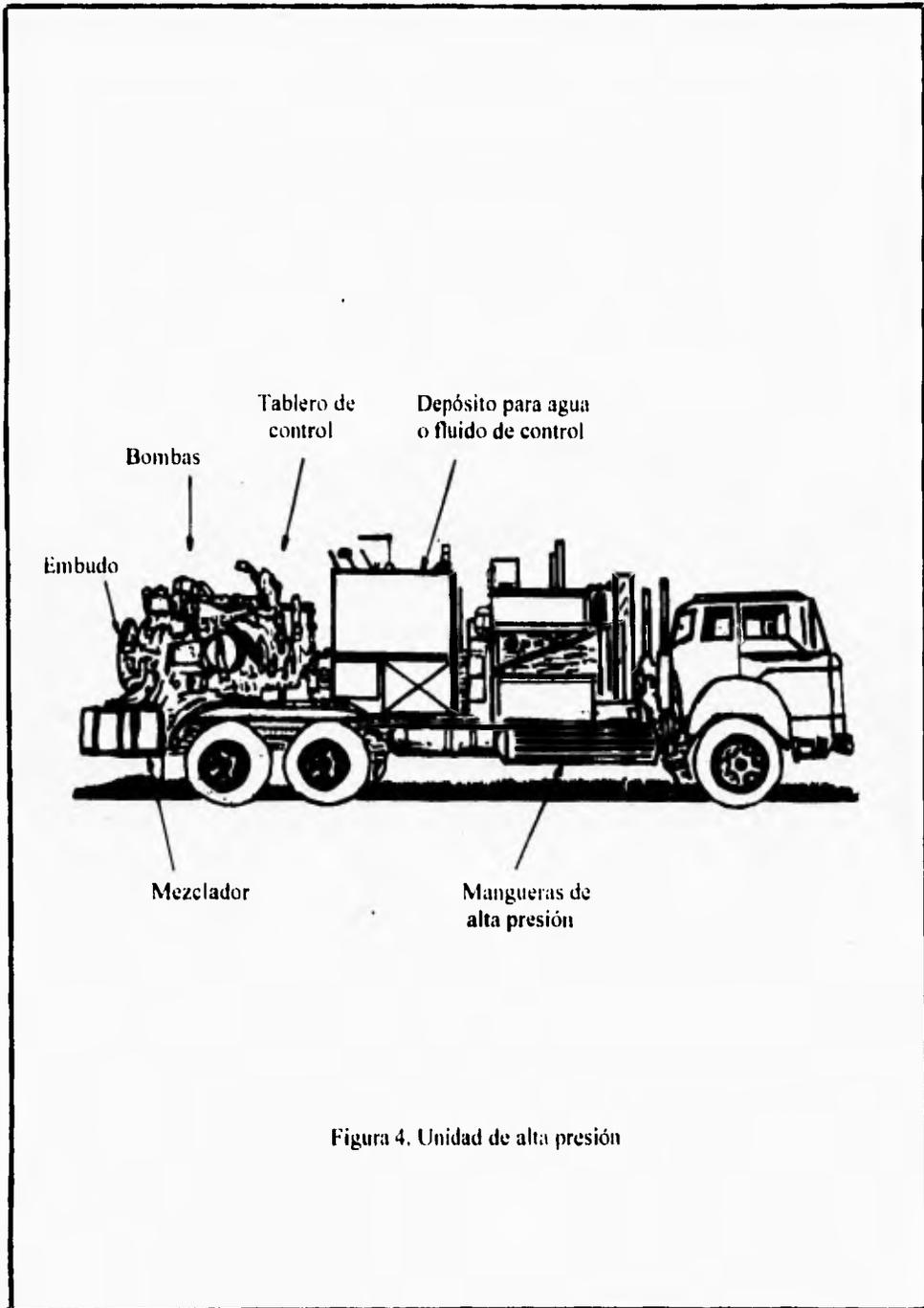




FIGURA 5. Balanza de lodos.

II.2 TOLVAS Y TROMPOS DE CEMENTO.

Dependiendo de la cantidad de cemento a utilizar y del tiempo disponible antes de la operación, se moverá en un silo estacionario o una unidad transportadora de cemento (trompo), revisando que no esté tapada la descarga del cemento por efecto de la humedad.

Si es en silo estacionario, se deberá energizar con aire diez minutos antes de iniciar la operación, si es en trompo, represionar con aire para descargar el cemento, verificar que la descarga al embudo de mezclado sea uniforme para que la densidad de la lechada sea homogénea.

Siempre se debe verificar que se cuente con el agua suficiente para la operación y comprobar en la unidad de alta presión, que el gasto de abastecimiento sea como mínimo de 3 bl/min., siendo agua sin impurezas para evitar fraguados prematuros.

Así mismo, deberá contarse con el volumen necesario en las presas, que las bombas estén en condiciones, verificar el gasto de la unidad y que la salida no esté tapada.

II.3 CONEXIONES SUPERFICIALES.

La programación, instalación y prueba de líneas superficiales es de suma importancia para las diferentes operaciones que se llevan a cabo, no solo en cementaciones forzadas, sino que también en cementaciones primarias de T.R., tapones por circulación, prueba a bocas de T.R. corta, estimulaciones y fracturamientos.

Para el caso de cementaciones forzadas se puede utilizar una tubería de línea de 3 1/2 pg. de diámetro, previamente instalada y probada con la presión máxima que se espere alcanzar en la operación, si por alguna circunstancia, el equipo de perforación o mantenimiento no cuenta con dicha línea, se procurara que la unidad de alta presión quede instalada junto al pozo, para evitar grandes longitudes de tubería de alta de diámetro reducido.

Deberá utilizar una sólo pieza para ir del suelo al piso de la mesa rotatoria en su caso, evitando que hayan conexiones intermedias que no puedan ser alcanzadas desde el suelo en caso de tener que desconectar por alguna falla del empaque (Figura 6).

Es necesario instalar una línea de la unidad de alta presión al cabezal de la tubería cementada para poder aplicar presión en el espacio anular, con el fin de contrarrestar los efectos de la presión interna sobre la tubería de producción, al estar inyectando el cemento y observar en el manómetro de la unidad de alta cualquier anomalía durante la operación.

Cuando la operación de cementación forzada es con tubería franca, deberá también conectarse una línea al cabezal para inyectar alternadamente por la tubería de producción y por el espacio anular, de acuerdo a la relación que se tenga entre ambos, serán los volúmenes, ésto cuando se coloque el cemento como tapón, pero cuando se haga directa la inyección de la línea al espacio anular servirá para circular inversa en cualquier momento.

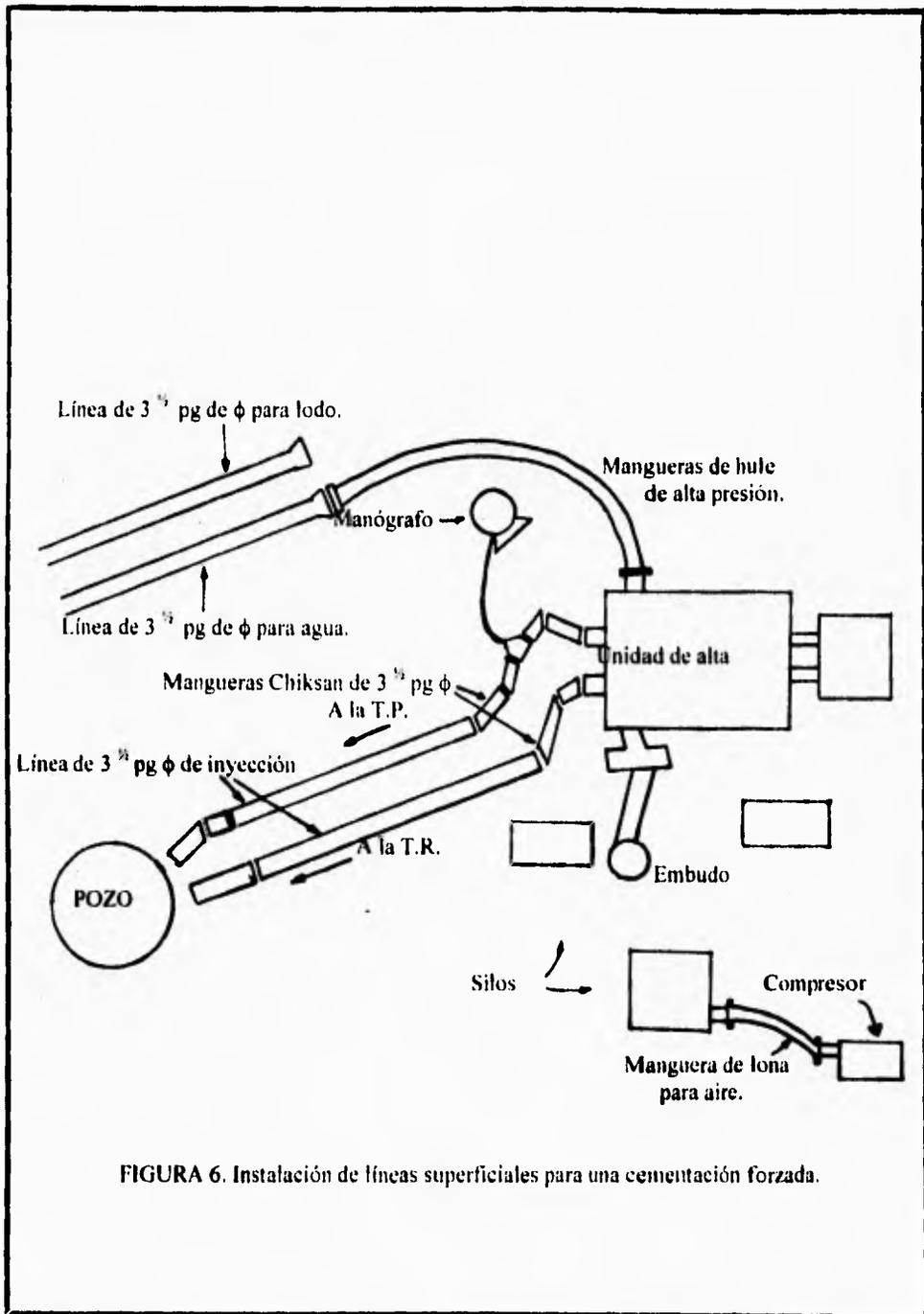


FIGURA 6. Instalación de líneas superficiales para una cementación forzada.

II.4 HERRAMIENTAS RECUPERABLES.

Los cementadores recuperables se prefieren, frecuentemente cuando se requieren los siguientes objetivos:

1. Operación para bloqueo.
2. Operación en zonas múltiples.
3. Usarlos como tapón recuperable para aislar un intervalo perforado más abajo, mientras se trabaja en un intervalo superior.

Estos empaques recuperables pueden ser bajados tantas veces como sea necesario. Las mayores objeciones para su uso son que:

a) El retorno no pueda evitarse cuando se libere la presión de desplazamiento a menos que se emplee una válvula de no retorno.

b) Al circular en inversa el exceso de cemento puede alterar la mezcla de cemento que ha sido forzada.

II.4.1. CEMENTADOR RECUPERABLE " RTTS ".

(RETRIEVASLE TEST TREAT SQUEEZE)

Este empacador tiene mandril de diámetro amplio, diseñado especialmente para utilizarse en operaciones de cementación forzada, pruebas y tratamiento.

También tiene una junta de seguridad tipo VR, para ayudar a sacar la tubería del pozo en el supuesto caso en que se quedara atrapada o cementada la herramienta.

El mandril de la junta de seguridad opera antes de que sea aplicada suficiente tensión para que destrabe el seguro de la camisa de tensión.

La herramienta está dotada de dos juegos de cuñas, uno mecánico y otro hidráulico, para evitar que el empacador se desanque y sea levantado al estar bombeando a través de él, cuando exista una presión diferencial. También va acompañado de una válvula de circulación arriba del empacador (Figura 7).

II.4.2. CEMENTADOR RECUPERABLE MODELO C-1.

El cementador recuperable modelo C-1 opera mecánicamente a base de vueltas a la derecha, para anclar en las paredes de las tuberías de revestimiento y a diferencia de otros, es recomendable para intervalos de poca profundidad en los cuales el peso de la sarta es muy ligero, por ser una herramienta de tensión.

Es un empacador utilizado en una gran variedad de operaciones como pruebas de tuberías de revestimiento, pruebas de producción y operaciones subsecuentes, donde se requiere soportar presiones diferenciales moderadas al efectuar operaciones tales como acidificaciones y cementaciones forzadas (Figura 8).

II.4.3. CEMENTADOR RECUPERABLE " RM ".

El cementador retrieve-matic (RM) es un empacador de diámetro interno máximo con botones hidráulicos y descargadores de presión integrales, se emplea para efectuar cualquier tipo de cementación a presión, prueba de tuberías de revestimiento fracturada y acidificaciones a presiones elevadas.

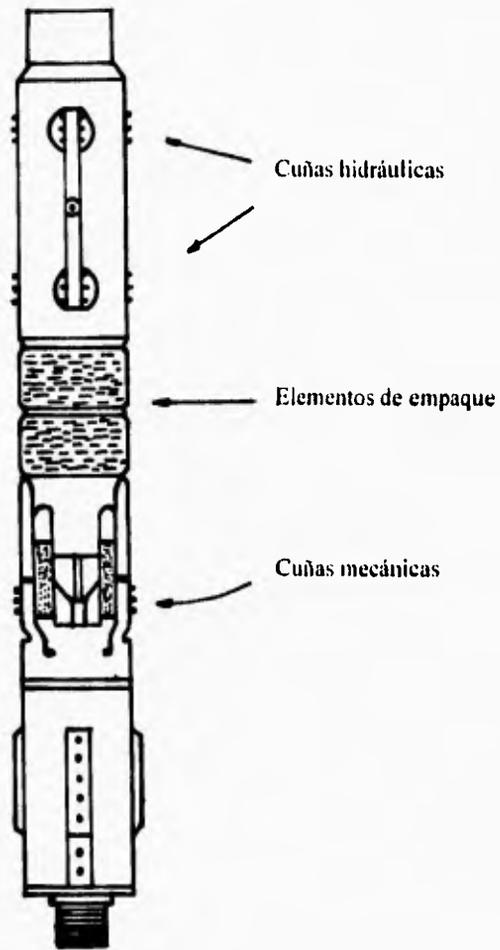


FIGURA 7. Cementador recuperable "RTTS".

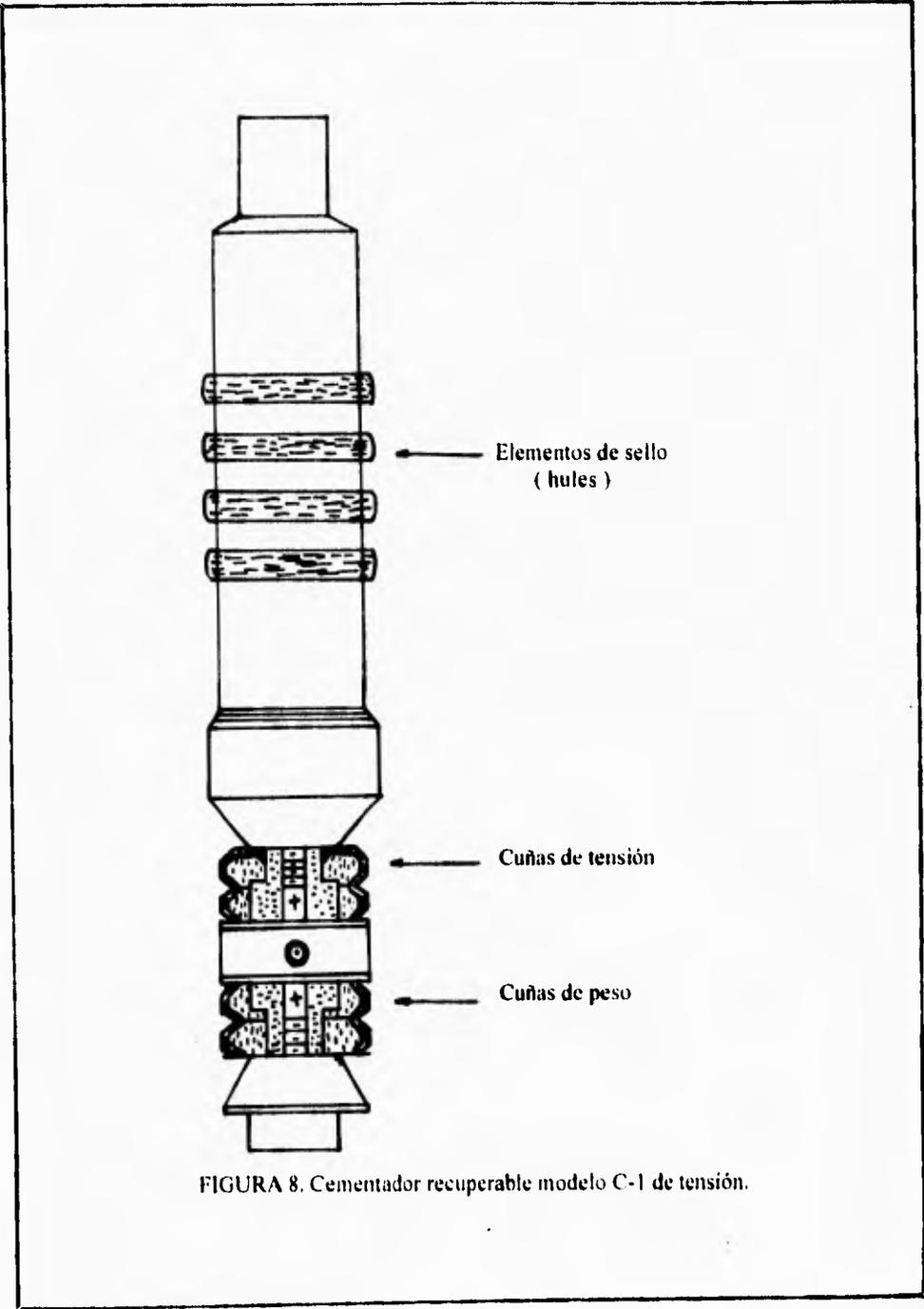


FIGURA 8. Cementador recuperable modelo C-1 de tensión.

Esta herramienta soporta presiones arriba y abajo, debido a que las variaciones de presión a través de las tuberías de producción desanclan los botones hidráulicos, ya que se encuentran aislados mediante una cámara de circulación que atraviesa el empacador longitudinalmente, esta cámara también sirve para igualar cualquier variación de presión a través de los botones (Figura 9).

II.5. RETENEDOR DE CEMENTO PERMANENTE MERCURY " K " .

Esta herramienta opera fácilmente a su anclaje, así como también se puede moler debido al material especial con que está fabricado, (aluminio y plomo). Normalmente se utiliza cuando el yacimiento maneja fluidos con altas presiones, ya que por diseño no permite que los fluidos inyectados regresen más que hasta donde se encuentra anclado y empacado.

El retenedor de cemento Mercury "K" tiene una válvula de doble acción de tipo manga balanceada que sirve para mantener la presión final forzada abajo de la herramienta.

La posición de válvula se selecciona al armar el retenedor con la herramienta de anclaje. Esta válvula permite probar la tubería de revestimiento antes de la operación con sólo levantar la conexión del diámetro reducido del retenedor y aplicando presión deseada.

Además de las herramientas mencionadas, existen otras que comúnmente en nuestros campos no se utilizan como son: la herramienta Set Down, tapón EZ-D, etc., que no sirven para efectuar diversos trabajos de cementación (Figura 10).

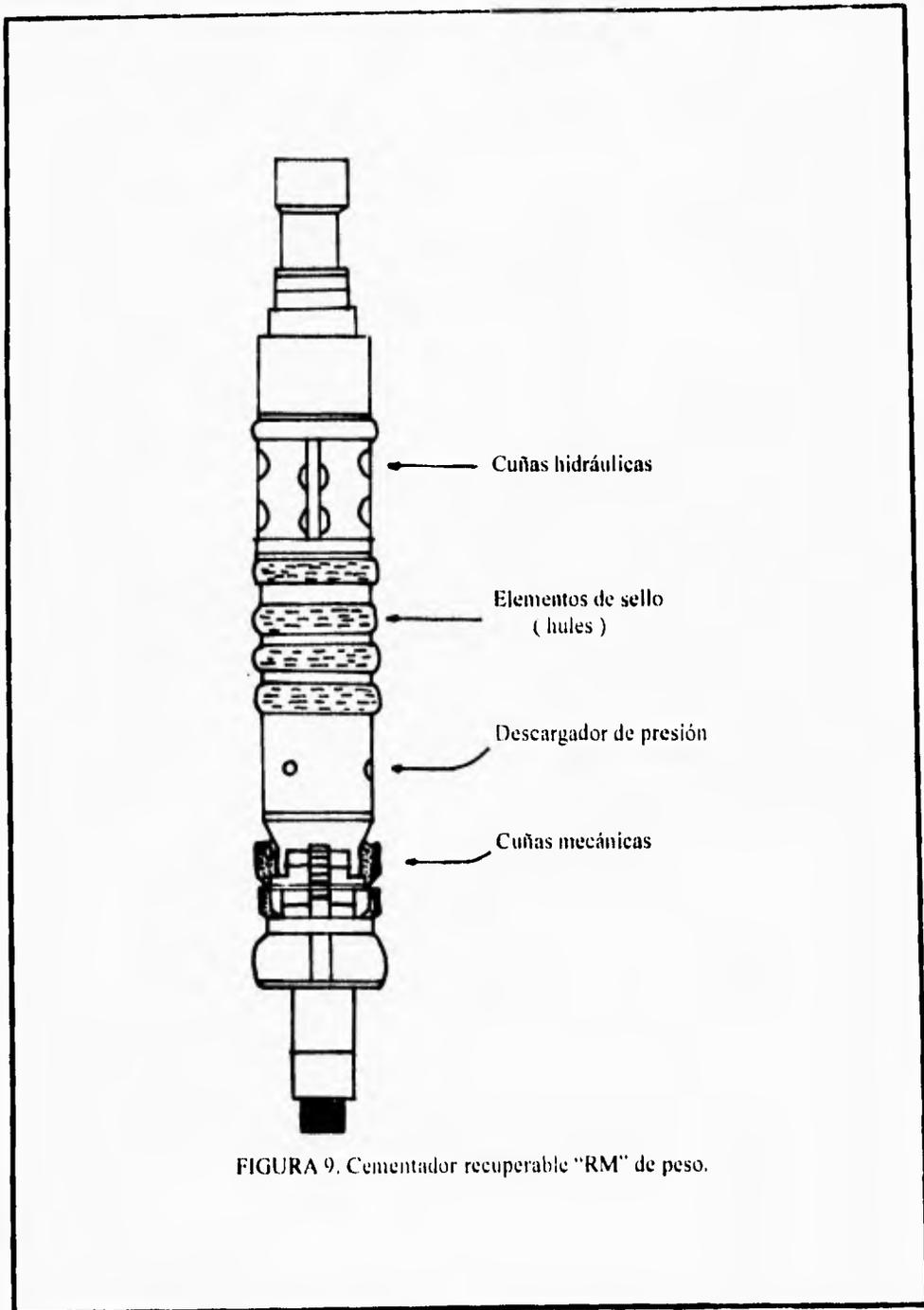


FIGURA 9. Cementador recuperable "RM" de peso.

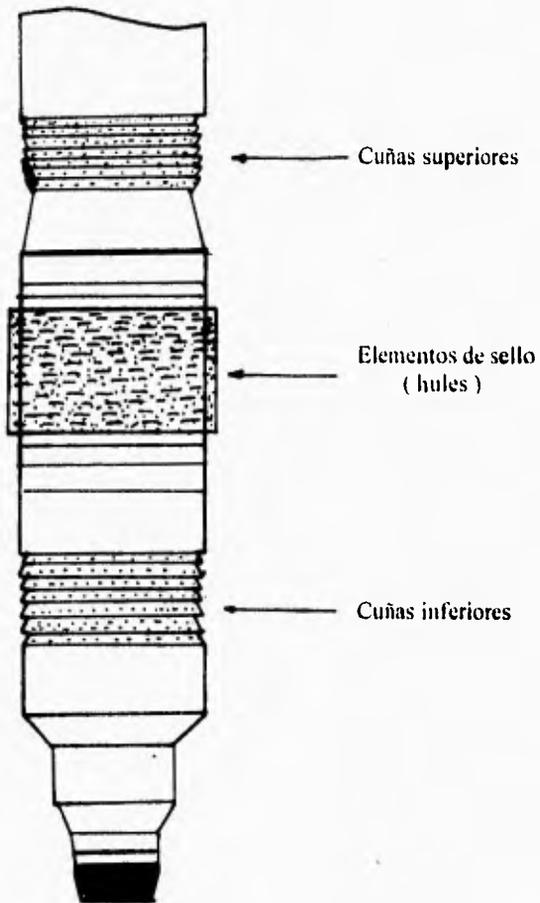


FIGURA 10. Retenedor de cemento permanente Mercury "K".

CAPITULO III

DESCRIPCION DE METODOS Y TECNICAS

III.1. METODO DE BRADEN-HEAD.

El método conocido de Braden-Head es el sistema original para forzar un cemento que penetra a un intervalo, se realiza a través de la T.P. sin el uso de empaque (Figura 11).

La presión se incrementa cerrando los preventores o las válvulas de control en la cabeza del pozo, después que el cemento ha sido bombeado cerca de el fondo de la sarta de cementación. Una cantidad predeterminada de cemento se mezcla y se bombea hasta una altura específica afuera de la T.P., es decir, se introduce la tubería debajo del área determinada y se esparce un preflujo a través del área. Se desplaza el preflujo dentro del área hacia abajo de la tubería y se inyecta el cemento premezclado a través del área a ser forzada. Se debe levantar la tubería hasta estar arriba de la cima. Lentamente se desplaza el cemento dentro del área hasta que se alcanza la presión máxima determinada anteriormente, en el fondo del agujero (presión baja, presión alta o bien en forma intermitente). La lechada de cemento remanente se regresa cuando se ha terminado la operación.

Este tipo de operación es muy conocida, aún cuando no sea aplicable, debido a su simplicidad no se utilizan herramientas adicionales. Se requiere que la tubería de revestimiento se encuentre en buenas condiciones, puesto que la tubería está sujeta a las presiones de trabajo.

CEMENTACION A PRESION POR EL METODO
DE BRANDEN-HEAD

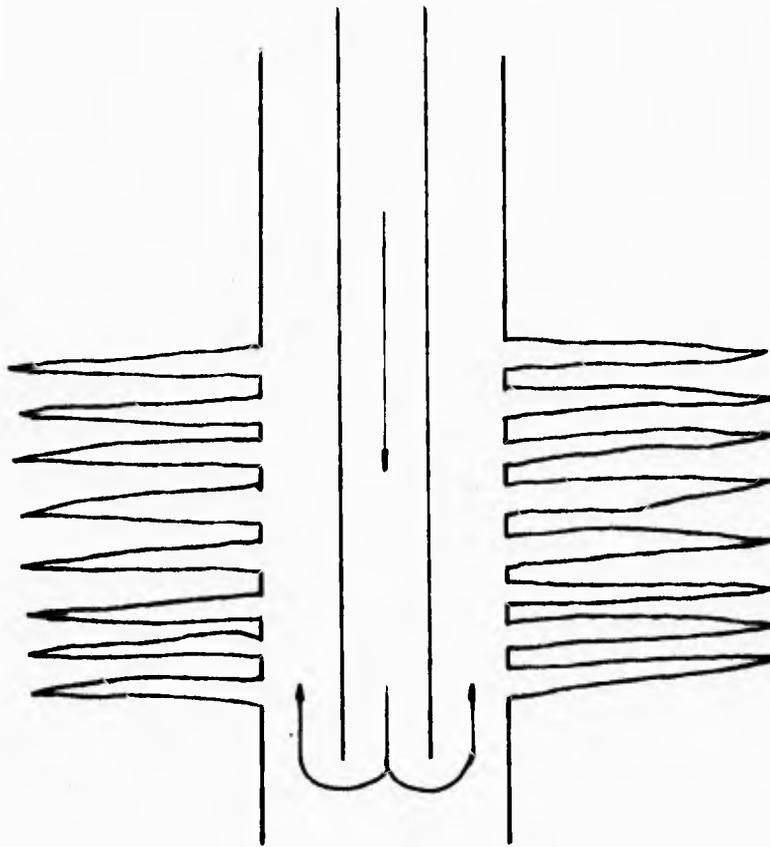


FIGURA 11.

También se requiere que la presión de la formación sea capaz de soportar una presión igual a la presión hidrostática de la columna de cemento en la tubería. Ambos requerimientos son factores específicos para una operación forzada de este tipo.

Una restricción es que no hay manera de impedir el flujo regresivo de cemento, excepto mantener una presión mientras se espera que el cemento frague.

Una vez levantada la T.P. fuera de la mezcla de cemento se cierran los preventores en la superficie, se bombea el fluido de desplazamiento por la T.P. hasta alcanzar la presión deseada de cementación forzada o hasta que se ha bombeado una cantidad específica de cemento de acuerdo con el programa.

Se cierra la cabeza del pozo en superficie y se inyecta la mezcla contra las zonas débiles, debido a que no se va a circular arriba del anillo.

Este método se usa exclusivamente en cementaciones forzadas en pozos someros, en taponamientos y algunas veces para sellar zonas con pérdida de circulación parcial durante la perforación, o cuando no se tiene el cementador apropiado.

Existen dos técnicas para efectuar ésta operación siendo las siguientes:

1. Forzar con la tubería franca frente a los disparos.

- a) Se introduce la tubería hasta la profundidad de los disparos, calibrándola de acuerdo a su diámetro.
- b) Se circula hasta homogeneizar columnas, verificando el nivel del lodo en las presas.

- c) Se cierran preventores anulares.
- d) Se efectúa prueba de admisión, si admite la formación se registra la presión y se abren los preventores.
- e) Se bombean los volúmenes separados.
- f) Se bombea la lechada y se desplaza hasta el extremo inferior de la T.P.
- g) Se cierran preventores
- h) Se inyecta cemento a gastos bajos, hasta terminar el volumen de lechada o hasta que se alcance la presión calculada.
- i) Se abren preventores
- j) Se levanta la tubería y se circula inverso dos veces la capacidad de la T.P.

Para seguridad ésta operación se deberá de efectuar con tubería de aluminio en el extremo.

2. Forzar con la tubería arriba del cemento.

- a) Repetir los pasos anteriores hasta el inciso (d).
- e) Se bombea el cemento para colocarlo como tapón por circulación.
- f) Se levanta la tubería hasta quedar arriba del cemento.
- g) Cerrar preventores anulares.
- h) Se inyecta cemento a la formación.
- i) Se abren preventores y se circula inverso.

III.2 METODO UTILIZANDO HERRAMIENTA RETENEDORA O CEMENTADORA

El método que utiliza herramienta de fondo se considera generalmente más aplicable, para determinadas operaciones, que el método de Branden-Head, ya que confina la presión en un punto específico en el pozo.

Este método emplea empaques ya sean recuperables o no, que se bajan con la T.P. hasta una posición cerca al de la zona que se va a cementar (Figura 12).

Antes de colocar el cemento, se realiza una prueba de admisión para determinar la presión de ruptura de la formación. En ciertas circunstancias, la sección debajo de las perforaciones a forzar deben aislarse con un tapón puente. Como por ejemplo, cuando se tienen en un pozo dos intervalos uno inferior y otro superior que se desea obturar.

Cuando se obtiene la presión de cementación deseada, se regresa el exceso de la lechada. Los objetivos de la cementación forzada y las condiciones de la zona determinarán si se efectúa a alta o baja presión

Los retenedores se usan generalmente en las siguientes condiciones:

- 1) Abandono (Aislamiento) de una zona de baja presión. El retenedor instalado en la tubería, se coloca a una profundidad específica y se suelta, para una colocación más precisa, el retener debe introducirse con el cable del registro eléctrico.

La tubería se conecta al retenedor y la lechada de cemento se desplaza hacia abajo del retenedor. El volumen de lechada se desplaza en su totalidad o hasta que se alcanza una determinada presión, la cual es frecuentemente alta.

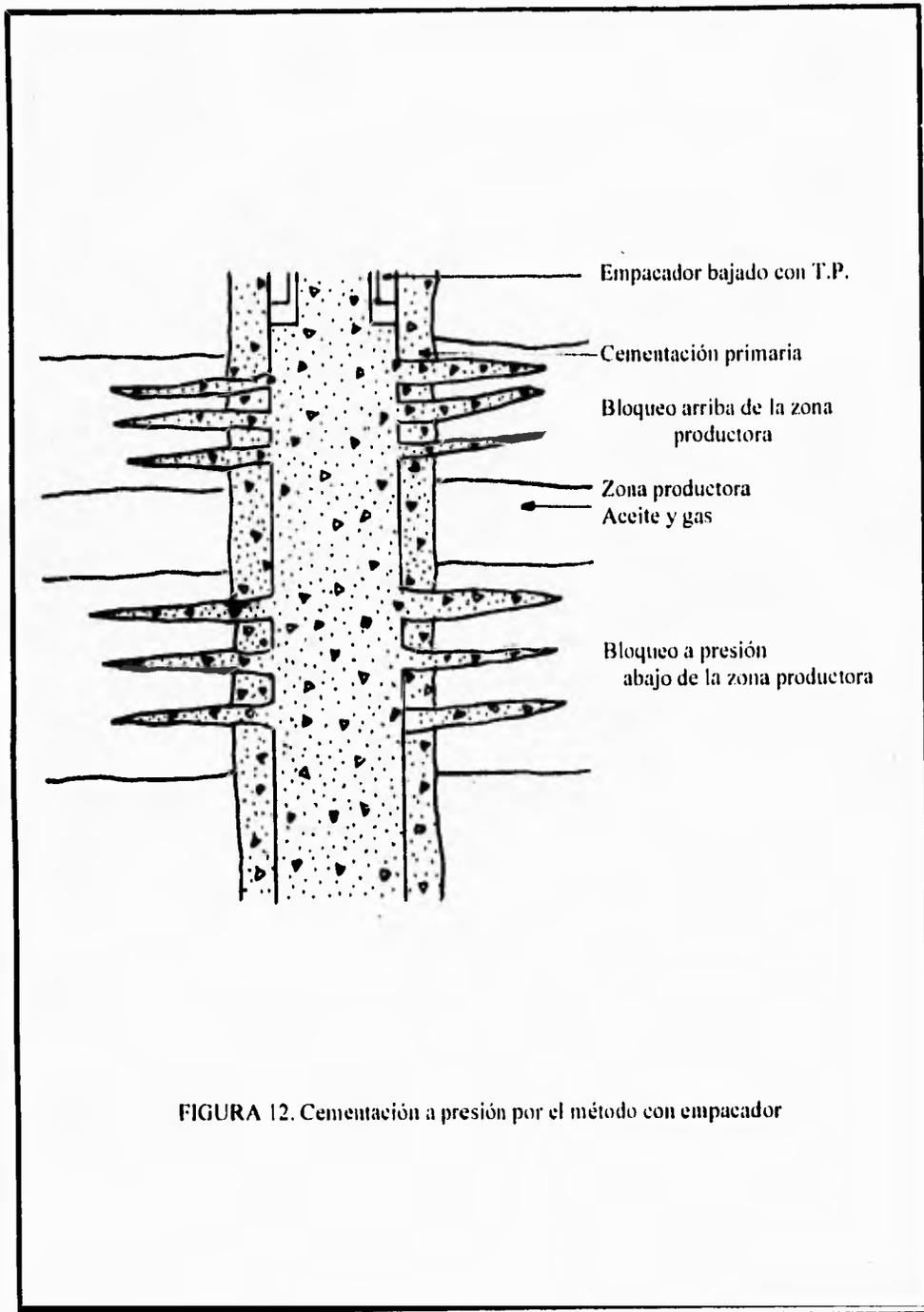


FIGURA 12. Cementación a presión por el método con empacador

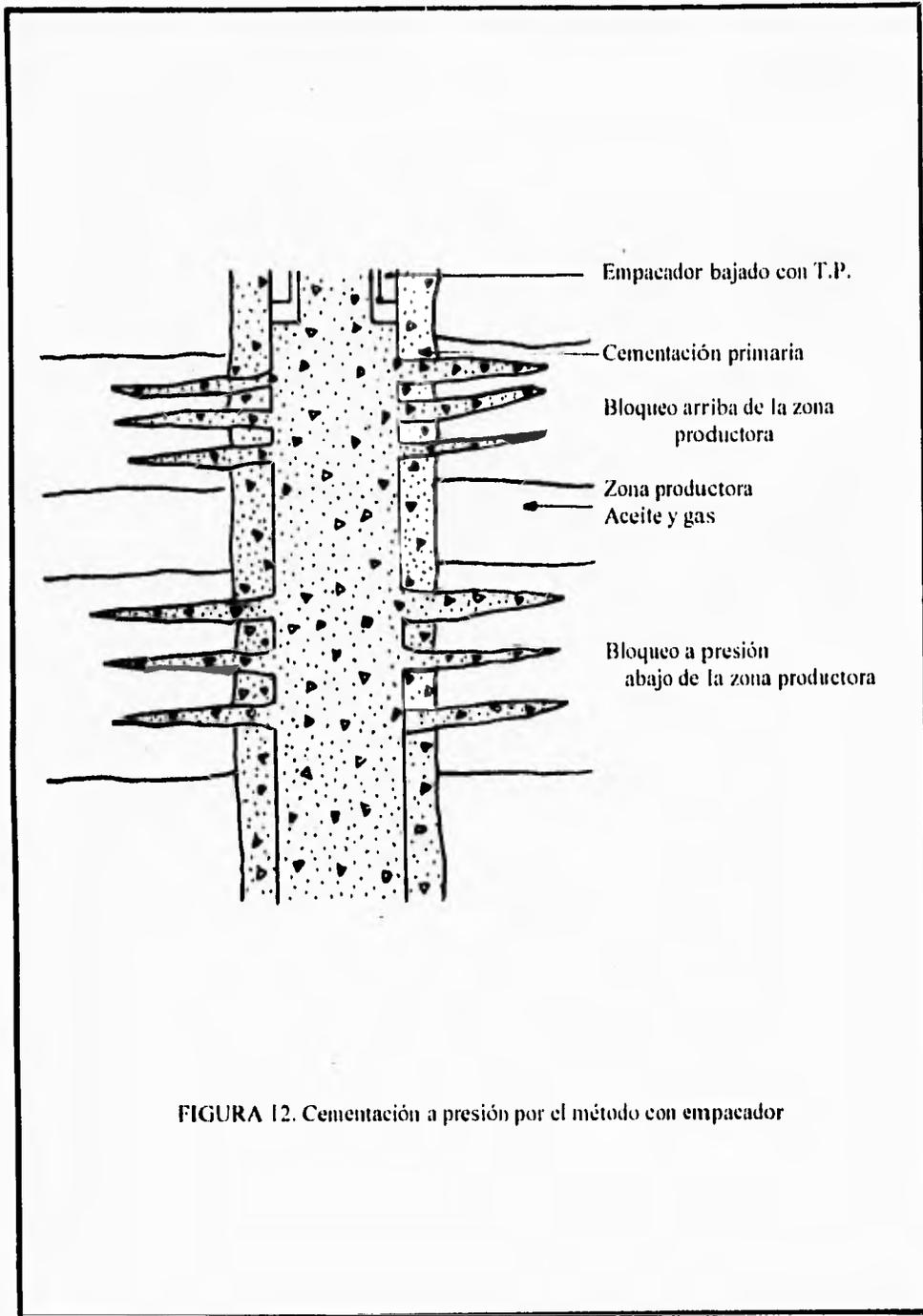


FIGURA 12. Cementación a presión por el método con empacador

Cuando ésto acontece, la tubería se levanta fuera del retenedor, una válvula "check" impide que el cemento regrese, se circula en inversa hasta que los fluidos de control regresen limpios. Se procede a sacar la tubería del pozo.

2) Controlar la entrada de agua de fondo, generalmente es una operación que se efectúa a baja presión, con un retenedor. La operación del retenedor es la misma que para un abandono de pozo.

PROGRAMA OPERATIVO CON HERRAMIENTA DE CEMENTACION FORZADA.

1. Escariar la tubería de revestimiento hasta la profundidad donde se va a anclar el retenedor o empacador recuperable.
2. Meter la herramienta seleccionada a la profundidad programada calibrando la tubería.
3. Con la herramienta a 100 metros abajo de la mesa rotaria, probar su efectividad con circulación.
4. Meter la herramienta hasta la posición de anclaje, establecer circulación y verificar el peso de la sarta con movimiento recíprocante para tener información, para después de la operación saber si existe problema de atrapamiento.
5. Instalar conexiones superficiales, líneas de control, probarlas de acuerdo con el estado mecánico del pozo y la operación a efectuar.
6. Anclar la herramienta según procedimiento establecido para cada uno de ellas.
7. Probar efectividad de la herramienta con peso, tensión y presión, la cual deberá ser en directa y por espacio anular, dependiendo del estado mecánico del pozo.
8. Levantar el soldador arriba del retenedor para probar efectividad del mismo, cerrando preventores y aplicando la presión equivalente al 30% del valor de la presión interna nominal de la tubería de menor grado.

9. Conectar el soldador al retenedor y efectuar la prueba de admisión al intervalo por cementar con gastos constantes, registrando las presiones hasta obtener la presión de admisión observando simultáneamente la presión del espacio anular y el peso de la tubería
10. Descargar la presión de la tubería.

Existen tres condiciones básicas que pueden presentarse para efectuar una recementación (Figura 13), que a continuación se indica:

A) Cuando existe pérdida total de circulación, se realiza la operación desde el inicio con el soldador conectado al retenedor, se bombea el volumen de cemento calculado y se desplaza con diesel o agua con un gasto bajo, desplazando hasta 200 metros antes de llegar al retenedor. Si al llegar a este volumen de desplazamiento se obtiene cierta presión, conectar el soldador y sacarlo a la superficie.

Si no se alcanza presión, desconectar el soldador, levantarlo a 1000 metros esperar el tiempo de fraguado necesario según el diseño de la lechada. Bajar soldador, conectarse al retenedor y efectuar otra prueba de admisión, si admite repetir la operación, en caso contrario continuar con el programa del pozo.

B) Cuando se tiene circulación y la densidad de cemento es mayor que la del lodo, se efectúa la operación con el soldador, arriba del retenedor, se cierran los preventores y se circula por el múltiple de estrangulación restringiendo el gasto según la presión.

Bombear los volúmenes separadores y el de cemento calculado, al llegar el agua a la parte inferior del soldador conectar éste al retenedor, represionar espacio anular con el 30% de la resistencia nominal de la presión interna del grado más bajo que

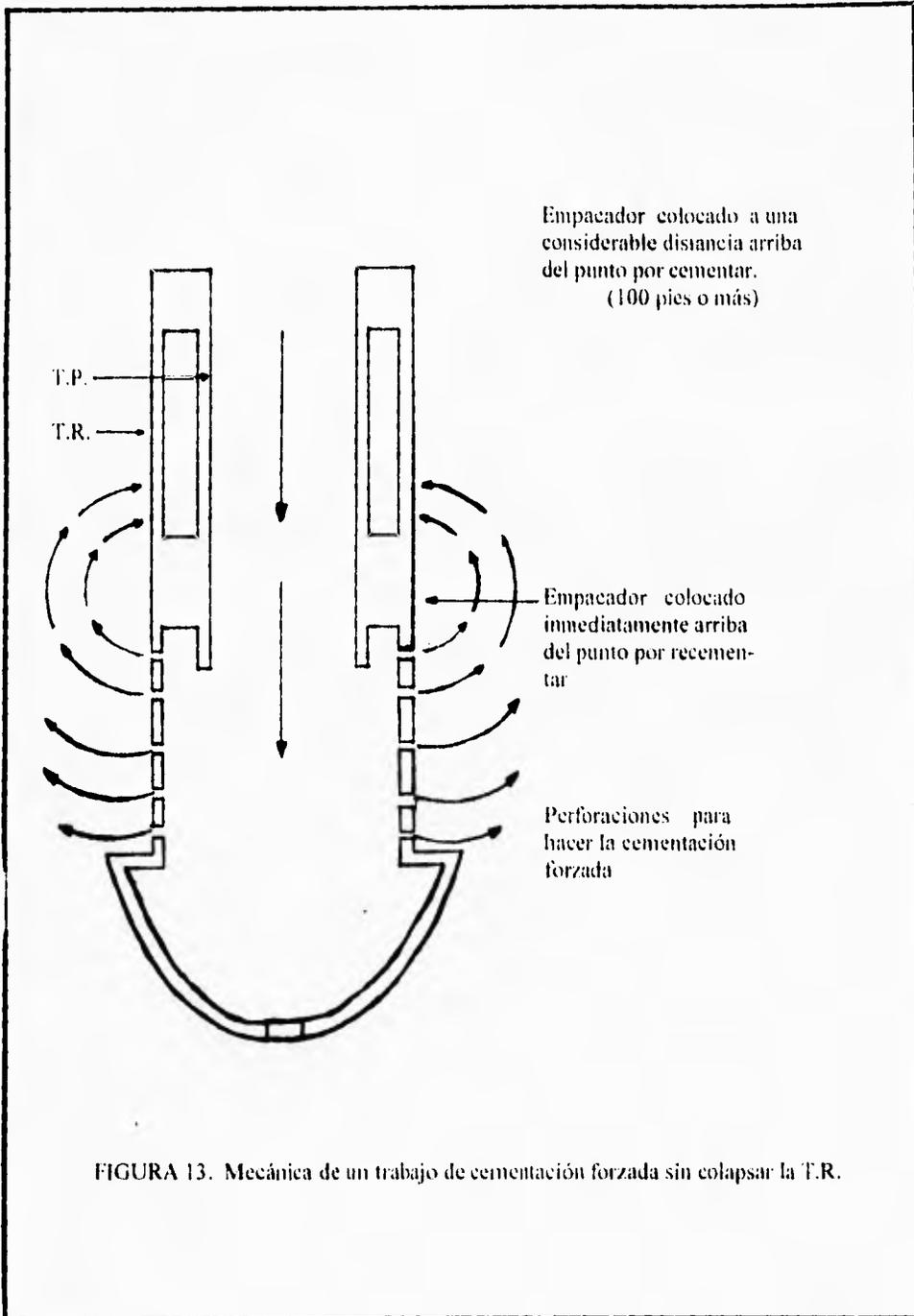


FIGURA 13. Mecánica de un trabajo de cementación forzada sin colapsar la T.R.

se tenga en esa T.R., posteriormente se procede a bombear el cemento a un gasto bajo, hasta alcanzar la presión final programada.

Descargar primero la presión del espacio anular y posteriormente la de la tubería de producción, desanclar el soltador y circular en inversa bombeando dos veces la capacidad de la tubería de producción, abrir los preventores y continuar con el programa del pozo.

C) Si la densidad del cemento es menor que la del lodo en operación, se levanta el soltador arriba del retenedor, bombear los volúmenes separadores seguidos del cemento programado hasta colocar el separador frente al retenedor, conectar el soltador, cerrar preventores, represionar el espacio anular y proceder a bombear el cemento hasta alcanzar la presión final programada.

Descargar la presión del espacio anular, posteriormente la de la tubería de producción, desanclar el soltador, cerrar preventores, circular en inversa, abrir preventores, sacar el soltador y continuar con el programa del pozo.

III.3 TECNICA DE CEMENTACION A ALTA PRESION.

La técnica a alta presión implica el rompimiento o fracturamiento de la formación inicialmente utilizando una cantidad de agua salada para determinar la presión de ruptura de la formación a ser forzada.

Se recomienda usar esta técnica cuando el objetivo del trabajo sea controlar la entrada de gas o agua (Figura 14).

TECNICA DE CEMENTACION FORZADA CON ALTA PRESION

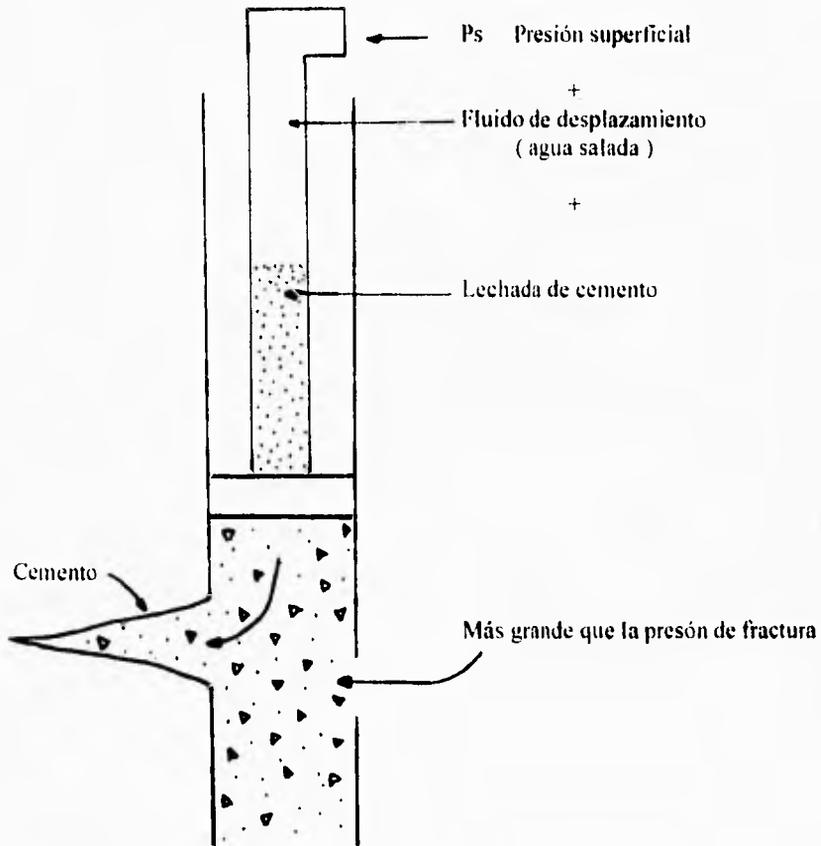


FIGURA 14.

No se debe usar lodo como fluido para romper o fracturar, ya que puede taponar o dañar la formación. Después de la ruptura, se coloca una mezcla de cemento y agua cerca de la formación y se bombea a bajo gasto.

Cuando se continúa bombeando, las presiones de inyección comienzan a crecer hasta que la presión en la superficie indique que el cemento se deshidrata o que se ha forzado.

La presión se mantendrá momentáneamente en la formación para verificar las condiciones estáticas y aliviar la presión para verificar si el cemento permanecerá en su lugar. Se circula en inverso el exceso de cemento sobre las perforaciones.

VENTAJAS DE LA CEMENTACION A ALTA PRESION.

1. La alta presión prolonga el movimiento de la lechada hacia un número máximo de perforaciones.
2. Una porción del cemento deshidratada debe perderse rápidamente en las perforaciones que rompan primero. Esto debe aceptarse si la lechada siguiente es lo bastante fluida para moverse hacia perforaciones más resistentes.
3. La alta presión es necesaria para forzar el cemento a través de los disparos llenos de lodo, pero no se requiere para forzarlo a través de intervalos limpios.
4. Se pueden obtener cementaciones forzadas a altas presiones, con el uso de tiempos de bombeo intermitentes depositando un filtrado de cemento en las perforaciones.

En un estudio de la influencia del enjarre de filtrado en el incremento de presión, durante la operación de cementación forzada a alta presión, se observó que en un pozo particular de alta presión superficial indicaba haber cubierto 40 pies

(12 metros) aproximadamente. Al tomar el registro sónico de cementación reveló que los 34 pies (10 metros) perforados superiores fueron sellados, pero los 6 pies (2 metros) inferiores requerían una cementación forzada adicional porque estaban parcialmente cubiertos. El cemento se había deshidratado en la zona superior, la sección más abierta, causando una resistencia al flujo (Figuras 15 y 16).

Para cementar formaciones de calizas o dolomias se debe dar énfasis en sellar efectivamente la cadena de fracturas o sistemas de canales detrás de la T.R.

Para cementaciones forzadas en formaciones carbonatadas fracturadas es más importante que el cemento llene las fracturas o canales, a que éste cree un enjarre. También se requieren mayores volúmenes de mezcla que para cementar en yacimientos de areniscas permeables.

Las técnicas de cementación forzada más aceptadas (alta y baja presión) cuentan con el uso de una lechada de cemento con alta pérdida de agua.

INFLUENCIA DEL ENJARRE DEL LODO

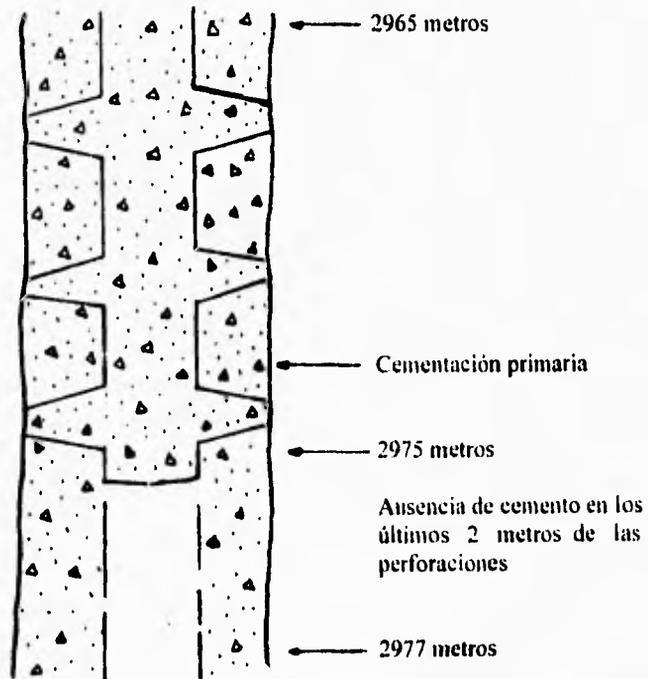


FIGURA 15

CONTROL DE FILTRADO EN UNA CEMENTACION A PRESION

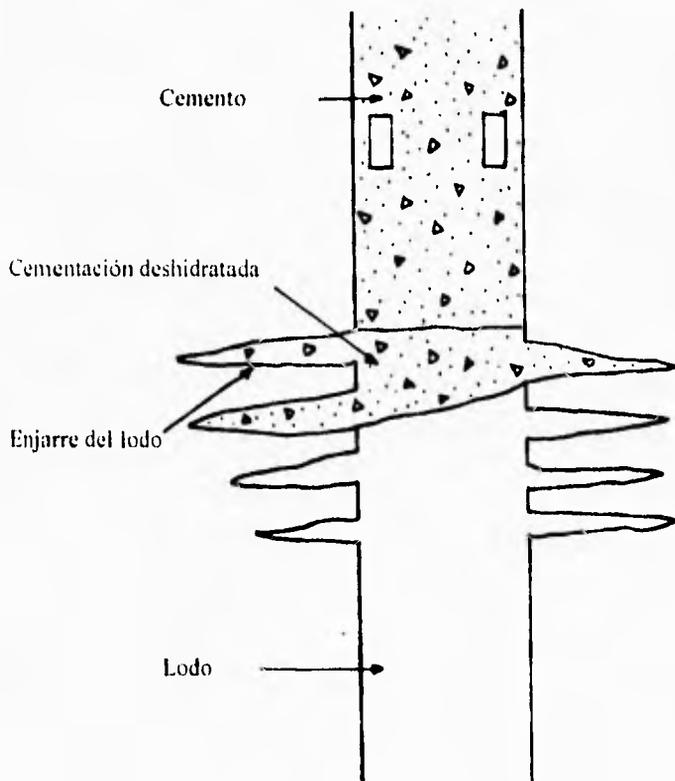


FIGURA 16

III.4 TÉCNICA DE CEMENTACION A BAJA PRESION.

La técnica de baja presión consiste en colocar el cemento sobre el intervalo que se va a forzar y aplicar suficiente presión para formar una costra de cemento deshidratado en las perforaciones, canales o fracturas que pueden estar abiertas.

Esta técnica ha sido la más eficiente para cementaciones forzadas, alcanzando un desarrollo en el cemento de control, filtrado y empaques recuperables. Con esta técnica se evita romper la formación (Figura 17).

La presión final se alcanza con suspensiones a intervalos de tiempo durante el proceso de cementación forzada (Figura 18).

Las propiedades de control del filtrado de la mezcla hacen formar un enjarre contra las perforaciones o la formación, mientras que la mezcla matriz permanece en estado fluido dentro de la T.R.

El filtrado de una mezcla de cemento y agua usualmente es muy rápido y la costra de cemento puede crecer dentro de la T.R. antes que la mezcla de cemento pueda cubrir una área dada de la formación.

El resultado puede ser un tapón de cemento a través de perforaciones abiertas en la parte superior de la zona y ningún recubrimiento de cemento a través de la perforaciones inferiores.

Se debe tomar en cuenta que para efectuar una cementación forzada a baja presión, la presión de fondo debe ser menor que la presión de fractura. Si ocurre fractura, el cemento entrará en ella, resultando en una mala colocación, con carencia de una adecuada deshidratación de la lechada en el intervalo que va a

III.4 TÉCNICA DE CEMENTACION A BAJA PRESION.

La técnica de baja presión consiste en colocar el cemento sobre el intervalo que se va a forzar y aplicar suficiente presión para formar una costra de cemento deshidratado en las perforaciones, canales o fracturas que pueden estar abiertas.

Esta técnica ha sido la más eficiente para cementaciones forzadas, alcanzando un desarrollo en el cemento de control, filtrado y empaques recuperables. Con esta técnica se evita romper la formación (Figura 17).

La presión final se alcanza con suspensiones a intervalos de tiempo durante el proceso de cementación forzada (Figura 18).

Las propiedades de control del filtrado de la mezcla hacen formar un enjarre contra las perforaciones o la formación, mientras que la mezcla matriz permanece en estado fluido dentro de la T.R.

El filtrado de una mezcla de cemento y agua usualmente es muy rápido y la costra de cemento puede crecer dentro de la T.R. antes que la mezcla de cemento pueda cubrir una área dada de la formación.

El resultado puede ser un tapón de cemento a través de perforaciones abiertas en la parte superior de la zona y ningún recubrimiento de cemento a través de la perforaciones inferiores.

Se debe tomar en cuenta que para efectuar una cementación forzada a baja presión, la presión de fondo debe ser menor que la presión de fractura. Si ocurre fractura, el cemento entrará en ella, resultando en una mala colocación, con carencia de una adecuada deshidratación de la lechada en el intervalo que va a

CEMENTACION FORZADA A BAJA PRESION

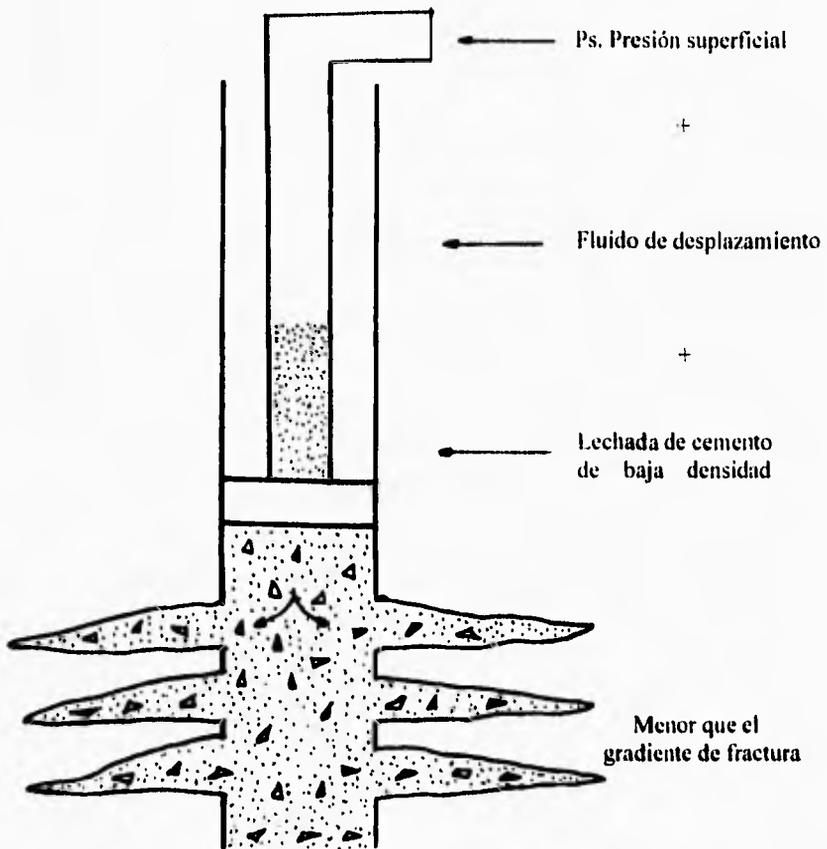


FIGURA 17

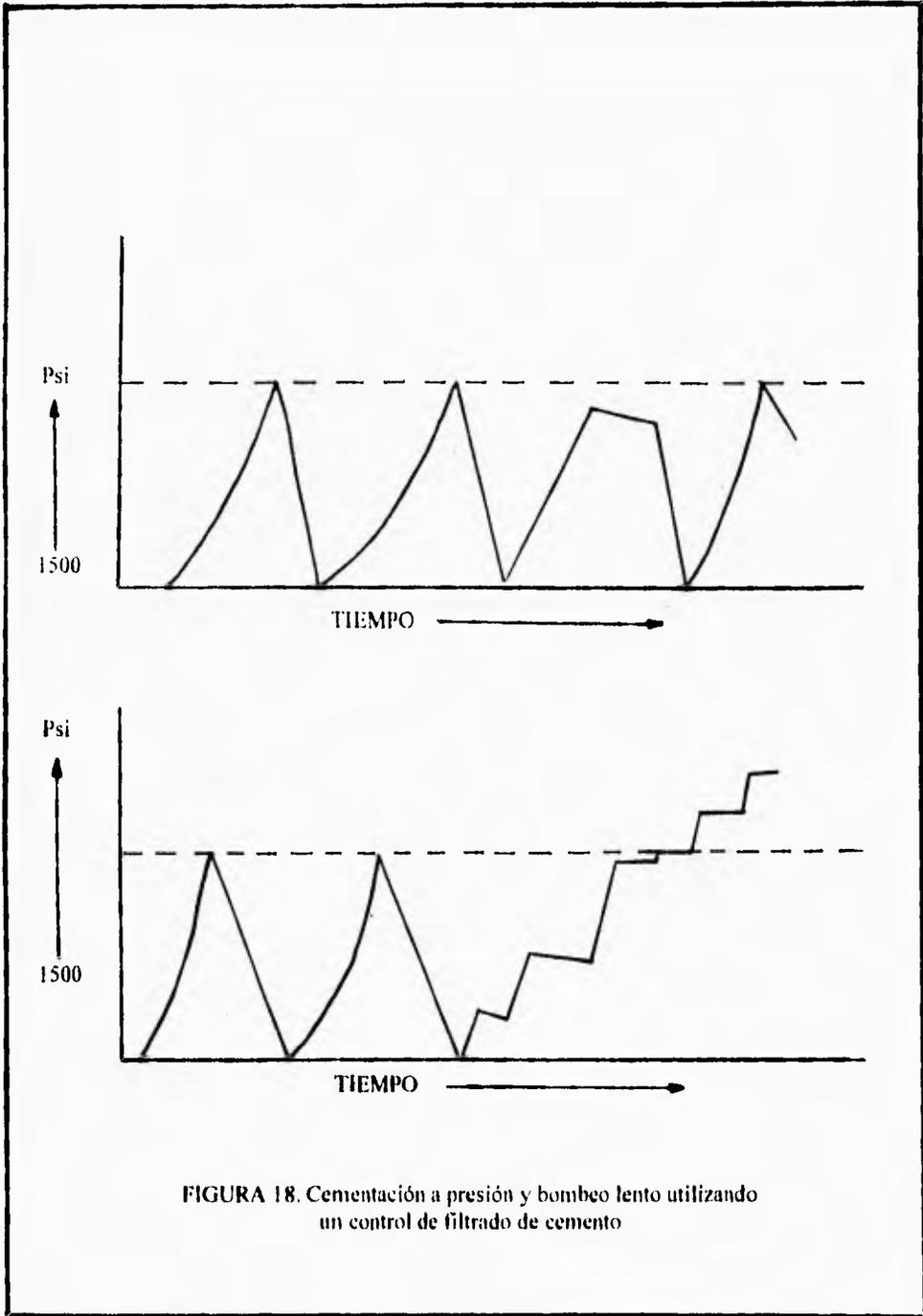


FIGURA 18. Cementación a presión y bombeo lento utilizando un control de filtrado de cemento

ser forzado y en el uso innecesario de grandes volúmenes de cemento. El despreciar la presión por fricción de un margen adicional contra la fractura.

Antes de la cementación forzada, debe construirse una gráfica mostrando la presión de fondo como una función del volumen acumulativo inyectado, para controlar el trabajo (Figura 19).

Las presiones de fondo reflejan el cambio en los gradientes de fluido, como son el fluido de lavado, para determinar la presión de fondo, el cemento y los fluidos de desplazamiento, que son bombeados dentro y a través de la tubería.

El volumen de la lechada de cemento forzado a través de los agujeros perforados en la tubería de revestimiento es relativamente pequeño. Cuando la presión es ejercida en la superficie, la lechada de cemento pierde agua, este filtrado invade las paredes adyacentes a los huecos, formando así los tapones o nódulos que consisten en un revoque de cemento sobre la formación porosa y permeable, teniendo inmediatamente detrás una mezcla de cemento espesa que tardará poco en fraguarse.

Cuando la presión se mantiene constante después de determinado tiempo, indica que se está llevando a cabo, poca o nada de deshidratación de la lechada, es entonces el momento indicado para disminuir paulatinamente la presión y regresar a la superficie el exceso de la lechada usada, dejando así los tapones o nódulos ya formados frente a las perforaciones.

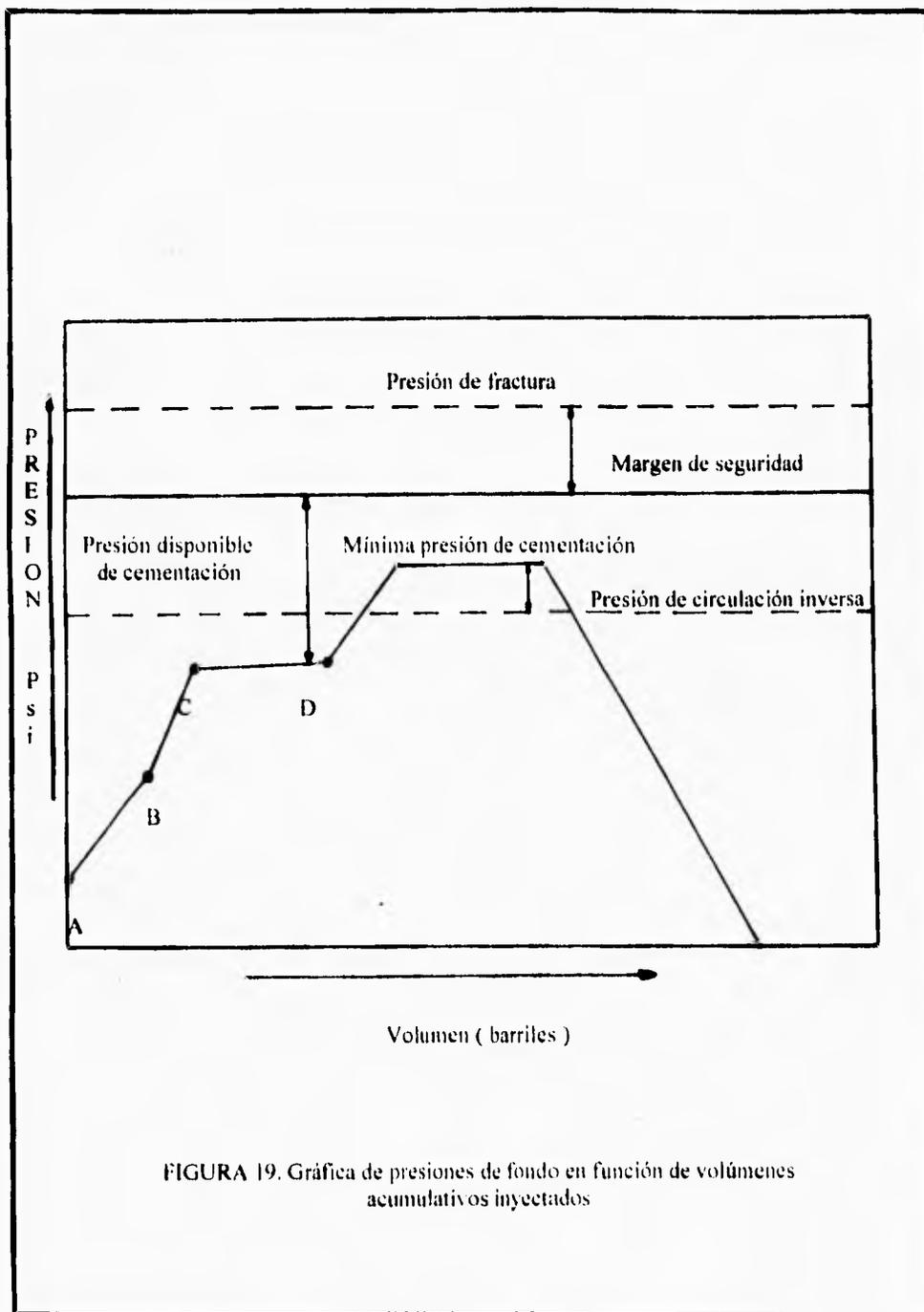


FIGURA 19. Gráfica de presiones de fondo en función de volúmenes acumulativos inyectados

VENTAJAS DE LA CEMENTACION A BAJA PRESION.

1. En muchas ocasiones es posible forzar el cemento a través de las perforaciones de intervalos largos con éxito, en una sola etapa.
2. Se pueden obtener cementaciones forzadas satisfactorias a presiones bajas sin desplazamiento excesivo.
3. En la cementación a baja presión, la presión de inyección es menor que la presión de fracturamiento de la roca.
4. Se reduce el tiempo de operación necesario para los trabajos en reparación de zonas cementadas.
5. El control del filtrado tiene gran influencia en una cementación a baja presión.

III.5 TIPOS DE BOMBEO.

El tiempo mínimo, es el tiempo requerido para mezclar y bombear la lechada al objetivo seleccionado.

El equipo para medir este tiempo se define en las normas API 10-A y 10-B. El probador de tiempo de espesamiento hace un simulacro de las condiciones del pozo donde las temperaturas del fondo varían hasta 260 °C y las presiones exceden los 980 Kg/cm².

En las cementaciones a presión, los requerimientos de tiempos de bombeo pueden variar de manera diferente, dependiendo de las características de la lechada y las condiciones del pozo.

III.5.1 BOMBEO LENTO.

Es el proceso más general en una cementación a presión, ya que al manejar pequeños volúmenes de lechada ayuda a que se forme una capa de cemento deshidratado frente a la formación porosa que primero acepta fluido, conforme las perforaciones y canales vayan siendo cubiertos por la capa de cemento deshidratado, se registrará un aumento de presión en la superficie. De manera particular es de suma importancia observar detenidamente la lectura del manómetro que registra la presión de inyección.

III.5.2 BOMBEO INTERMITENTE.

El bombeo lento se puede complementar con un bombeo intermitente para llevar a cabo mejores trabajos en cementaciones forzadas. Las intermitencias efectuadas en una operación a presión reducirán significativamente la capacidad de bombeo de la lechada. A pesar de que dichas intermitencias no se consideran durante las pruebas de laboratorio, puede ser un factor que contribuya a dejar el cemento fraguado dentro de la tubería antes de obtener la presión de cementación deseada.

Cuando la presión de inyección es demasiado baja o se abate rápidamente, se recomienda un bombeo lento y periodos prolongados de intermitencia para acelerar, de esta forma, la deshidratación del cemento, lo que permitirá alcanzar la presión máxima.

III.5.3 BOMBEO RAPIDO.

Generalmente nunca se justifica ni recomienda realizar trabajos a bombeo rápido, ya que implica manejar mayores volúmenes, aumentando la presión superficial y que se ocasionen fracturamientos.

Las altas presiones de trabajo no aumentan las posibilidades de éxito, pero si incrementan la probabilidad de fracturar la formación.

CAPITULO IV

DISEÑO DE CEMENTO

Hoy en día los pozos en la industria petrolera cubren una variedad muy amplia de profundidades y condiciones de temperatura, por lo que estos parámetros son con el tiempo cada vez más grandes y las condiciones de explotación mas sofisticadas.

La composición del cemento se diseña regularmente para condiciones variables de temperatura, hasta 260° C en pozos profundos. Las presiones varían desde la atmosférica hasta 14 000 lb/pg². Esto ha sido posible a través del desarrollo de aditivos que modifiquen los cementos disponibles para requerimientos individuales.

Actualmente se emplean más de 40 aditivos en varios tipos de cemento API (Instituto Americano del Petróleo), para obtener características óptimas de lechadas de cemento en cualquier condición de los pozos. Debido al cemento básico (clase G y H API) y del equipo mezclador a granel, el uso de aditivos se ha hecho mas simple y flexible. Ahora, las lechadas se pueden diseñar a requerimientos específicos.

Prácticamente todos los aditivos de cemento que normalmente se usan son sólidos en polvo, que se han mezclado en seco con el cemento antes de que éste sea transportado al pozo. No obstante, en caso de ser necesario la mayoría de los aditivos pueden añadirse al agua para mezclarse en el sitio de trabajo.

IV.1 CRITERIOS DE DISEÑO.

En la literatura se han reportado muchas reglas para diseñar y seleccionar volúmenes de cemento. Las más comunes son:

1. Usar un volumen de 0.1 a 0.2 pie³ de lechada de cemento por perforación, más del requerido para llenar la tubería de revestimiento, a través del intervalo perforado, con un volumen mínimo de 50 sacos.
2. El volumen de cemento no debe exceder la capacidad de la sarta de trabajo, si se necesitan volúmenes mayores se debe considerar el uso de una tubería de trabajo de mayor diámetro.
3. Usar dos sacos de cemento por pie de perforación.
4. El volumen no debe ser tan grande que forme una columna que no pueda ser desalojada por circulación inversa.
5. El volumen en la mayoría de las operaciones a baja presión es usualmente de 50 a 75 sacos de cemento.
6. En operaciones forzadas a alta presión, si se alcanza un gasto de inyección de 2 bl/min, utilizar un volumen mínimo de 100 sacos de cemento, después de una interrupción repentina en la presión de bombeo.

Las recomendaciones para bombear la lechada en una cementación forzada con buenos resultados son:

1. Planear el trabajo en términos de la presión de fondo.
2. Usar la presión de fondo y los volúmenes acumulativos inyectados como indicadores de lo que ocurre en el fondo.

FACTORES QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO DEL CEMENTO.

El tiempo de fraguado y la resistencia del cemento usado en la industria petrolera, se encuentran afectados por diferentes factores, entre los más importantes se consideran los siguientes:

A) Relación agua-cemento.

La correcta relación agua-cemento que se debe tener en cuenta al preparar una lechada, es de gran importancia para obtener una buena cementación. Al preparar, es necesario usar la suficiente cantidad de agua para asegurar una completa hidratación de los constituyentes del cemento.

El cemento común requiere aproximadamente 20% de su peso en agua para lograr una hidratación completa, pero por pruebas de laboratorio se ha experimentado, que se necesita casi el doble de esta cantidad de agua para que la mezcla se pueda bombear.

En ocasiones es conveniente usar lechadas espesas, utilizando poca cantidad de agua. Estas mezclas ayudan a desplazar el lodo por delante, teniendo menor peligro de contaminación, pero también se corre el riesgo de que el cemento frague antes de haberse bombeado al lugar programado.

La cantidad correcta de agua que debe ser empleada para preparar la lechada de cemento es debidamente calculada mediante la siguiente fórmula:

$$A.R. = P - (D * V) / (D - 1) \quad (8)$$

Donde:

A.R. = Agua requerida (lt/saco).

P = Peso total de los productos (Kg).

D = Densidad de la lechada requerida (Kg/lt).

V = Volumen total de los productos (lt).

Cabe mencionar que para calcular el volumen total de la mezcla, se obtiene primeramente el volumen de cada producto con la siguiente ecuación:

$$V = \text{Peso del producto} / \text{Densidad del producto} \quad (9)$$

El rendimiento de la lechada (R) en lt/saco se calcula:

$$R = A. R. + V \quad (10)$$

El peso y volumen de la lechada de cemento producida por las diversas relaciones agua-cemento, son fácilmente determinados, siempre y cuando se trate de cementos sin modificar.

B) Efecto de la contaminación con agua salada.

El cemento usado en las cementaciones de pozos, se encuentra sujeto a las reacciones químicas que originan al contaminarse la lechada de cemento con las aguas del subsuelo que contengan sales en disolución y si esta contaminación se efectúa durante el desplazamiento del cemento o antes de que el fraguado inicial haya tenido lugar, sus propiedades pueden ser muy alteradas. En caso extremo, el cemento no logra fraguar y tiene que ser bombeado fuera del pozo.

Las soluciones diluidas de cloruros, aceleran o disminuyen el tiempo de fraguado de acuerdo con el porcentaje de la contaminación, las de calcio y magnesio son mucho más activas en estas condiciones que las de sodio.

El contacto con soluciones sulfurosas, en determinadas concentraciones pueden retardar el tiempo de fraguado, así como pequeños porcentajes de las mismas pueden acelerarlo. La contaminación con sales alcalinas influye en el tiempo de fraguado y si queda el cemento en contacto con ellas, sufrirá posteriormente degradación.

Los sulfatos de magnesio y sodio, ocasionan una falta de solidez en el cemento endurecido y en caso de fraguar en contacto con ellos, reaccionarán con el aluminio tricálcico hidratado del cemento, formando nuevos compuestos, que darán por resultado una recristalización y por consiguiente una expansión y desmoronamiento del cemento.

El cemento con una cantidad menor de 3% de aluminato tricálcico, parece ser inmune a éste efecto; pero si este constituyente se encuentra en grandes cantidades, las aguas sulfurosas pueden tener un efecto perjudicial, el porcentaje máximo de aluminato tricálcico para los cementos básicos se encuentra fijado en las normas API.

La presencia de aguas sulfurosas a altas temperaturas (100 ° C o más) afectan en menor grado que a bajas temperaturas (40 ° C o menos) y como generalmente las cementaciones se efectúan a profundidades en las que tienen altas temperaturas, esto ayudaría a contrarrestar su efecto.

Los cementos que tienen un alto porcentaje de óxido férrico son más resistentes a la acción de las aguas sulfurosas que los cementos ordinarios.

La falta de solidez en el cemento, también se debe a una expansión después de su fraguado, como resultado de una tardía cristalización de la cal y el magnesio libres en el cemento mismo, por esta razón más del 5% de magnesio se considera perjudicial en el cemento "portland". Posibles fallas en las cementaciones ocasionadas por esta reacción química, pueden no ser apreciables al principio, pero posteriormente se presentará el desmoronamiento y la desintegración del cemento dando como resultado una cementación defectuosa.

C) Contaminación con lodo.

La contaminación de la lechada con el fluido de control, reduce grandemente la resistencia del cemento. Al bombear cemento en contacto directo con el lodo del pozo, puede ocurrir que sólo la parte superior de la lechada se contamine y debido a que su densidad es menor, no afecta al resto de la columna de cemento.

Análisis físicos y químicos hechos en pruebas de laboratorio, han indicado que aún, por pequeñas que sean las contaminaciones, éstas le restan solidez al cemento, por lo tanto habrá que evitar el contacto directo, enviando por delante de la lechada, un volumen de agua que vaya desplazando el lodo contenido en el pozo y a la vez limpiando las paredes del agujero.

D) Contaminación con gas y/o aceite.

La presencia de gas en un pozo, en el que se va a colocar cemento, es perjudicial para su fraguado, debido a que el cemento se encuentra en constante agitación por el paso continuo de burbujas de gas a través de su masa, que impiden la cohesión de sus moléculas, dando como resultado un cemento poroso que fácilmente permitirá el paso de fluidos a través de él.

Pruebas hechas en el laboratorio para determinar el comportamiento de la lechada de cemento frente al aceite, mostraron al preparar una mezcla con relación agua-cemento de 50% en peso, con un 10% de aceite, el fraguado tarda 9.5 horas, si la relación es de 20% de aceite tardará 14.5 horas y si la relación es de 50% tardará 19.0 horas, por último si la cantidad de aceite llega a ser de 100% el cemento no podrá fraguar.

Este retardo no es afectado por la presión y temperatura existentes al hacer las pruebas, por esta razón al efectuar una cementación hay que evitar en lo posible una contaminación de la lechada con el aceite.

E) Influencia de la presión y temperatura.

La presión que actúa sobre la lechada, es un factor muy importante en el tiempo de fraguado del cemento, principalmente en los pozos profundos donde las columnas hidrostática que actúan sobre el cemento, originan presiones de varios cientos de Kg/cm^2 , las cuales aceleran el tiempo de fraguado.

Debido a que la presión y la temperatura influyen en el tiempo de espesamiento de una lechada de cemento, la presión al forzar, afectará la deshidratación de la mezcla. Es necesario conocer la temperatura de la formación, para el diseño correcto de la mezcla de cemento.

Las temperaturas encontradas en una cementación forzada son más altas que las de una cementación primaria, porque el agujero no se ha circulado con suficiente fluido para bajar la temperatura del fondo del pozo. Al aumentar la temperatura con la profundidad se originan problemas durante la cementación ocasionando un fraguado prematuro de la lechada.

Por pruebas efectuadas, se ha visto que cuando la presión aplicada a la lechada de cemento sube de 1 a 350 Kg/cm² el tiempo de bombeo de una mezcla preparada con cemento común, se reduce un 50% de su tiempo original y el fraguado inicial se acelera un 60%.

Una alta presión hidrostática, ocasiona también pérdida de agua en la lechada. Al aumentar ésta de acuerdo con la profundidad, da lugar a que el agua de la lechada sea forzada a la formación, antes de que empiece a fraguar el cemento, iniciándose un fraguado prematuro.

La mayor pérdida de agua se presenta en las zonas de alta permeabilidad como son las arenas, areniscas y calizas permeables.

F) Tipo de cemento.

Otro de los factores que afecta el tiempo de espesamiento es el tipo de cemento empleado.

Para la mayor parte de las cementaciones forzadas, puede usarse cemento clase A, G o H, ya que éstos cementos son manufacturados para operaciones forzadas hasta 2500 metros de profundidad, donde las temperaturas estáticas de fondo no exceden los 100 ° C, (Tabla 3). Para pozos profundos, los cementos de clase G o H, se pueden retardar adecuadamente sobre la base de un tiempo estimado, necesario para realizar el trabajo. Una mezcla de cemento se puede diseñar para cualquier condición forzada.

TABLA 3
TIEMPOS DE ESPESAMIENTO DEL CEMENTO EN CEMENTACION
DE T.R. CONTRA CEMENTACION A PRESION.

PROFUNDIDAD: 8,000 PIES (2438 MTS.)

TEMPERATURAS:

CEMENTACION DE TUBERIA DE REVESTIMIENTO; 125 ° F (52 ° C)

CEMENTACION A PRESION; 159 ° F (71 ° C)

CEMENTO: API CLASE "H"

AGUA NECESARIA: 4.3 GAL/ SACO (16.3 LT/SACO)

AGENTE DE BAJA PERDIDA DE FLUIDO (por ciento)	TIEMPO DE ESPESAMIENTO Cementacion de tubería de revestimiento.	HORAS : MINUTOS Cementacion a presión.
0.0	2 : 16	1 : 15
0.4	4 : 00	2 : 16
0.6	5 : 32	4 : 15
0.8	6 : 15	4 : 28

G) Control de filtrado.

El filtrado es importante al diseñar cemento para un trabajo de cementación. Cuando el cemento es bombeado contra un medio permeable, la presión diferencial fuerza el agua del cemento formándose un enjarre filtrado.

La pérdida de filtrado de un cemento neto está dentro de 600 a 1200 cc. a los 30 minutos de acuerdo a las normas API. En efecto, la deshidratación ocurre tan rápido que es difícil medirla. La pérdida de filtrado puede reducirse a valores bajos de 25 a 100 cc. a los 30 minutos, añadiendo bentonita y agentes dispersantes o polímeros (Figura 20).

IV.2 MANUFACTURA DEL CEMENTO.

El material bruto o materia prima básica utilizada para la manufactura del cemento es la caliza (carbonato de calcio) y sales minerales de las arcillas (dióxido de silicio).

La mezcla de éstos materiales se funde a temperaturas de 2600 a 3000 ° F en hornos rotatorios y el material obtenido se conoce con el nombre de "Clinker" del cemento, una vez enfriado se pulveriza y se mezcla con una cierta cantidad de yeso en proporción de 1.5 a 3.0% el cual controla el tiempo de fraguado.

Cuando estos materiales se hidratan se combinan y forman cuatro principales componentes:

EFFECTO DE FORMACION DE PROTUBERANCIAS

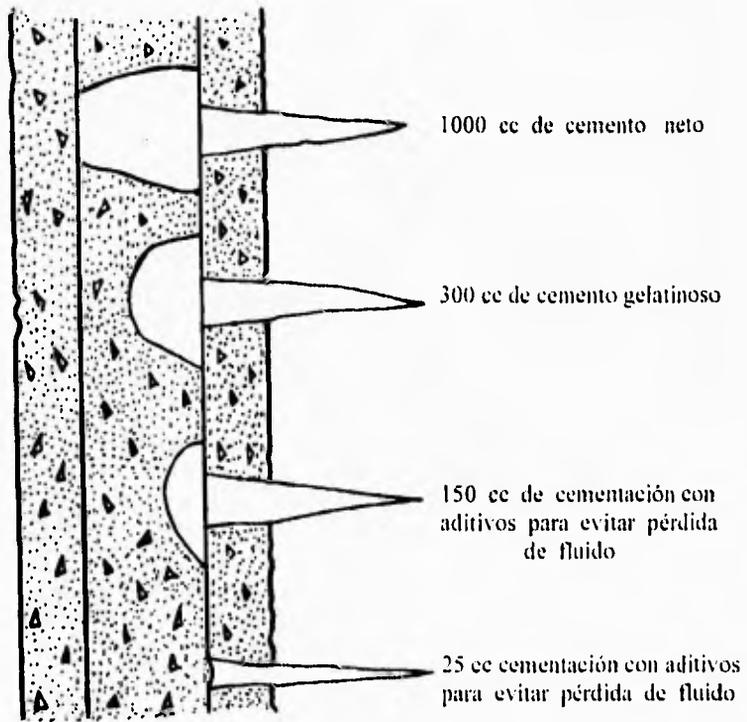


FIGURA 20

COMPONENTES	FORMULAS
Aluminio tricálcico	3 CaO AlO ₃
Silicato tricálcico	3 CaO SiO ₂
Silicato dicálcico	2 CaO SiO ₂
Aluminoferrito tetracálcico	4 CaO AlO ₃ FeO ₃

IV.3 CLASIFICACION DE LOS CEMENTOS.

La industria petrolera emplea cementos con especificaciones marcadas por el Instituto Americano del Petróleo (API). Estas normas catalogan a los cementos de acuerdo a la siguiente designación.

CLASE A. Se emplean desde la superficie hasta profundidades de 1800 metros (6000 pies), es similar al tipo 1 ASTM.

CLASE B. Se emplean desde la superficie hasta profundidades de 1830 metros (6000 pies). Se requiere que sea resistente a la acción de los sulfatos tanto en concentraciones moderadas y elevadas. Es similar al tipo II ASTM.

CLASE C. Se emplean desde la superficie hasta profundidades de 1830 metros (6000 pies); cuando las condiciones requeridas son para una resistencia prematura y puede o no ser resistente al ataque de los sulfatos.

CLASE D. Se emplean para profundidades de 1630 a 3050 metros (6000 a 10000 pies), a presión y temperaturas de medias a altas. Resistente a la acción de los sulfatos.

CLASE E. Se emplean para profundidades de 3050 a 4270 metros (10000 a 14000 pies) para alta presión y temperatura.

CLASE F. Se emplean para profundidades de 3050 a 4880 metros (10000 a 16000 pies), para presiones y temperaturas extremas y debe ser para alta resistencia a la acción de los sulfatos.

CLASE G. Se emplean desde la superficie hasta profundidades de 2440 metros básicamente, pero con la adición de aceleradores o retardadores de fraguado, su uso se puede generalizar para cualquier tipo de presión, temperatura y también para la acción de los sulfatos.

CLASE H. Su uso es similar al de la clase G, pero su resistencia a la acción de los sulfatos es moderada (Tabla 4).

IV.4 ADITIVOS PARA CEMENTO.

Dependiendo de la forma en que se seleccionan, los aditivos pueden afectar las características de los cementos de la siguiente manera:

1. La densidad se puede variar de 1.25 a 2.90 gr/cc.
2. La resistencia a la compresión se puede variar de 14 a 1400 Kg/cm².
3. El tiempo de fraguado se puede acelerar o retardar, para producir un cemento que frague en poco tiempo o permanezca fluido hasta por 36 horas.
4. La filtración del cemento se puede disminuir hasta de 25 cc/30 min., cuando se mida con una criba de malla 325 a una presión diferencial de 70 Kg/cm².
5. Las propiedades de flujo pueden modificarse en una gran variedad según el tipo de aditivo.

TABLA 4. ANALISIS TIPICO DE UN CEMENTO (API) CLASE G o H.

OXIDO DE CALCIO	(Ca O)	64.77 %
DIOXIDO DE SILICIO	(Si O ₂)	22.33 %
OXIDO DE FIERRO	(Fe ₂ O ₃)	4.10 %
OXIDO DE ALUMINIO	(Al ₂ O ₃)	4.75 %
OXIDO DE MAGNESIO	(Mg O)	1.14 %
TRIOXIDO DE AZUFRE	(SO ₃)	1.67 %
OXIDO DE POTASIO	(K ₂ O)	1.08 %
PERDIDA POR INGNICION	-----	0.54 %

6. El cemento ya fraguado puede hacerse resistente a la corrosión, densificándolos o variando su composición química.
7. Los reactivos para desarrollar fuerzas de gelatinosidad o materiales granulares, fibrosos o de escamas, pueden añadirse para controlar la pérdida de la lechada de cemento.
8. La permeabilidad puede controlarse en pozos de bajas temperaturas por medio de la densificación y a temperaturas altas arriba de 110 ° C por medio de la densificación y del uso de polvo fino de silicio.
9. Pueden reducirse los costos, con una elección adecuada, dependiendo de los requerimientos del pozo y de las características que se desean obtener.
10. El calor de hidratación, liberado durante el proceso de fraguado, puede controlarse por medio del uso de arena, cenizas volcánicas o bentonita en combinación con agua.

Clasificación de aditivos para cemento.

1. Catalizadores o aceleradores.
2. Aditivos ligeros.
3. Aditivos pesados.
4. Retardadores.
5. Agentes de control en zonas de pérdida de circulación.
6. Agentes de control de filtración.
7. Reductores de fricción.
8. Materiales especiales.

IV.4.1 CATALIZADORES DE CEMENTO.

Las lechadas de cemento, para emplearse en formaciones poco profundas y a bajas temperaturas, requieren de la catalización para disminuir el tiempo de espesamiento para acelerar una temprana resistencia, particularmente en formaciones cuya temperatura es inferior a 38 ° C. Usando los catalizadores, cementos básicos y buenas prácticas mecánicas, puede lograrse una resistencia de 35 Kg/cm² en solo 4 horas. En general, esta resistencia se acepta como mínima para unir y soportar la tubería, además de lograr buen sello entre la formación y la T.R. en cementaciones forzadas.

Los catalizadores de uso común son: Cloruro de calcio, cloruro de sodio, yeso y silicato de sodio, este último es empleado para catalizar lechadas de cemento que contengan carboximetil-hidroxiethyl celulosa (retardador CMHEC).

Las lechadas pueden catalizarse densificándose. Esto puede lograrse añadiendo un reductor de fricción y disminuyendo la cantidad de agua de la mezcla denominándose cementos con dispersantes y agua de reducción.

Así mismo, el agua de mar se usa ampliamente para mezclar el cemento en sitios marinos. Contiene hasta 23.000 ppm. de cloruros, los cuales actúan como catalizadores.

IV.4.2 ADITIVOS LIGEROS.

Las lechadas de cemento puro, preparadas de clase A, B, G o H, empleando la cantidad de agua recomendada, tendrá una densidad promedio de 1.80 gr/cc.

Muchas formaciones no soportarán grandes columnas de cemento, cuando se trata de cementaciones de tuberías de revestimiento y provocan zonas de pérdida tratándose de cementaciones forzadas con gran volumen de cemento.

Como consecuencia, existen aditivos para reducir la densidad. Los aditivos también ayudan a aumentar el rendimiento y a veces disminuyen la pérdida de filtrado. La densidad de la lechada puede reducirse agregando agua, sólidos de baja densidad o añadiendo ambos.

Los materiales que se usan comúnmente en los cementos como aditivos, se muestran en la Tabla 5, en orden de efectividad general.

Los altos porcentajes de bentonita en el cemento reducen la resistencia a la compresión y el tiempo de espesamiento, tanto de los cementos regulares como de los retardados. La bentonita y el agua también reducen la resistencia al ataque de sustancias químicas de aguas de formación.

IV.4.3 ADITIVOS PARA TRABAJO PESADO.

Para contrarrestar las altas presiones frecuentemente encontradas en pozos profundos, se requiere de lechadas de alta densidad. Para aumentar la densidad el aditivo, deberá tener una densidad relativa de 1.54 a 1.60 gr/cc., tener un bajo requerimiento de agua, no reducir en gran parte la resistencia del cemento, afectar poco el tiempo de bombeo de la lechada, poseer un tamaño de partícula uniforme, ser químicamente inerte y compatible con otros aditivos.

TABLA 5

TIPO DE MATERIAL (ADITIVO)	CANTIDAD DE MATERIAL EMPLEADO
Bentonita	
Cemento con mezcla de bentonita.	
Cemento con bentonita prehidratada.	
Cemento con bentonita modificada.	De 2 a 16 %
Cemento salado de alto gel.	
Tierra diatomácea.	10 - 40 %
HIDROCARBUROS NATURALES	
Gilsonita.	De 0.454 a 23 Kg/saco cemento.
Carbón.	De 2.3 a 23 Kg/saco cemento.
Perlita expandida.	De 2.3 a 9 Kg/saco cemento.
Nitrógeno.	Del 0 al 70 % (dependiendo de la densidad, temperatura y presión.
Puzolana artificial.	33 Kg/saco cemento
Cenizas volátiles.	Variable
Cemento puzolana bentonita.	Variable.

Los materiales mas comunes empleados para densificar los cementos son: Hematita, fierro-óxido de titanio, barita, arena, sal, cemento con dispersante y reductor de agua.

IV.4.4 RETARDADORES DE CEMENTO.

En las operaciones de cementaciones forzadas se trabaja con temperaturas de fondo entre 77 y 260 ° C encontradas a profundidades entre 1830 y 7622 metros. Para evitar que el cemento frague rápidamente deben añadirse retardadores a las lechadas, los cuales pueden colocarse sin riesgo aproximadamente hasta 2440 metros. El aumento de temperaturas acelera el espesamiento.

Los retardadores para cemento deben ser compatibles con los diferentes aditivos que se emplean y también con el cemento mismo.

Los retardadores comercialmente disponibles son compuestos tales como las ligninas (sales de ácido lignosulfónico), gomas, almidones, ácidos orgánicos débiles y derivados de la celulosa.

Los cemento de la clase G y H no contienen un retardador químico al fabricarse, pueden emplearse hasta 2440 metros como se reciben y responden bien a retardadores para emplearse a profundidades hasta de 8000 metros.

Los productos químicos que se emplean actualmente como retardadores son: Lignosulfonato de calcio y Lignosulfonato de sodio.

Son derivados de la madera y se han empleado con muy buenos resultados en la retardación de cementos de todas las clases API. a profundidades de 3658 a 4268 metros, o donde las temperaturas estáticas de fondo del pozo varían de 127 a 143 °C.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

CARBOXIMETIL HIDROXIETIL CELULOSA (CMHEC).

Además de ser un derivado de la madera es un retardador altamente efectivo. Puede emplearse en concentraciones hasta de 0.70 % sin añadir agua adicional para controlar la viscosidad del lodo.

El CMHEC es compatible en todas las clases de cemento API. de clase A, G, o H, a profundidades que van de 3050 a 3658 metros, a temperaturas de 110 a 127 ° C.

IV.4.5 ADITIVOS PARA CONTROLAR ZONAS DE PERDIDA DE CIRCULACION.

La zona de pérdida de circulación se define como la falta de circulación, de el fluido de perforación o de la lechada. Esas zonas no deben confundirse con la disminución del volumen debido a la filtración, o del volumen requerido para llenar el pozo.

Generalmente se emplean dos pasos para combatir la pérdida por circulación. El primero es reducir la densidad del lodo, y el segundo es añadir un material de refuerzo o de sellado. Otra técnica es añadir nitrógeno al sistema de lodo (Tabla 6).

IV.4.6 ADITIVOS DE CONTROL DE FILTRACION PARA CEMENTOS.

La pérdida de filtrado de las lechadas se reducen con aditivos para:

1. Mejorar la cementación forzada. Una lechada pura API. de clase G o H tiene en 30 minutos una pérdida de filtrado en exceso de 1000 cc.

**TABLA 6. MATERIALES PARA CONTROLAR PERDIDA
DE CIRCULACION**

TIPO	MATERIAL	CANTIDAD EMPLEADA	AGUA REQUERIDA
Granular	Gilbonita	De 3 a 23 Kg/saco	8 lt/23 Kg.
De expansión	Perlita	De 0.014 a 0.028 m ³ /saco	16 lt/0.028 m ³
Granular	Corteza de nogal	De 0.454 a 4.5 Kg/saco	3.2 lt/23 Kg
Granular	Carbón	De 0.454 a 4.5 Kg/saco	8 lt/23 Kg
Hojas laminares	Celofán	De 0.007 a 0.014 Kg/saco	Ninguna
Fibras cortas	Nylon	De 0.007 a 0.014 Kg/saco	Ninguna

2. Evitar la deshidratación prematura o pérdida de agua en zonas porosas, particularmente en cementaciones de tuberías cortas.
3. Proteger formaciones sensibles.

Las principales funciones de los aditivos de control de filtración son: Formar películas o membranas, los cuales controlan al flujo de agua de la lechada y evitar la rápida deshidratación, también mejorar la distribución del tamaño de las partículas, la cual determina como el líquido se contiene en la lechada.

Los materiales de control de filtración más ampliamente usados son los polímeros orgánicos (celulosa) y los reductores de fricción.

Los compuestos de celulosa de alto peso molecular producirán una baja pérdida de agua en todos los tipos de composiciones de cementación a concentraciones que varían de 0.5 al 1.5 % en peso de cemento. No obstante el requerimiento de agua deberá ser ajustado para producir la viscosidad adecuada (Tabla 7).

IV.4.7 REDUCTORES DE FRICCIÓN.

Los agentes dispersantes se añaden a las lechadas para mejorar sus propiedades de flujo. Las lechadas dispersas tienen menos viscosidad y pueden bombearse en turbulencia a bajas presiones, disminuyendo así los caballos de fuerza requeridos y reduciendo las oportunidades de pérdida de circulación y deshidratación prematura. Los dispersantes disminuyen el punto de cedencia y las fuerzas de gelatinosidad de las lechadas.

Los dispersantes que se añaden por lo común a las lechadas son: Los polímeros, los agentes de pérdida de filtrado en los cementos, gel y la sal (cloruro de sodio).

TABLA 7. ADITIVOS DE CONTROL DE FILTRACION

*Generalmente para toda clase de cemento

TIPO Y FUNCION DEL ADITIVO	CANTIDAD RECOMENDADA	COMO SE EMPLEA
Polimeros orgánicos (celulosa para formar películas).	de 0.5 a 1.5 por ciento	Mezclado en seco.
Polimeros orgánicos (dispersan) para mejorar la distribución de partículas y formar películas.	de 0.5 a 1.25 por ciento	Mezclado en seco o con agua de mezcla.
Carboximetil hidroxietil celulosa. Para formar películas.	1.0 gal/s.	Mezclado en seco.
Aditivos de latex. Para formar películas.	1.0 gal/s.	Mezclado en seco o con agua de mezcla.
Cemento con bentonita con dispersante. Para mejorar la distribución de partículas.	1.0 de dispersante.	Mezcla por baches.

Se han empleado a bajas temperaturas debido a que retardan ligeramente el cemento. Los lignosulfonatos de calcio-aleaciones de ácido orgánico retardan y generalmente se usan en altas temperaturas.

IV.4.8 POLIMEROS.

Los polímeros fabricados en polvo, producen propiedades poco usuales y útiles en los sistemas de cemento. No aceleran ni retardan significativamente la mayoría de las lechadas, pero reducen marcadamente la viscosidad aparente. Se adaptan bien a temperaturas que varían de 20 a 150 ° C.

A pesar de su propiedad de reducción de viscosidad, los polímeros no provocan una separación excesiva de agua libre o el fraguado de partículas de cemento. Son prácticamente compatibles con todos los sistemas de cemento excepto con aquellos que contienen altas concentraciones de sal. Los polímeros aligeran esas lechadas inicialmente parecen efectivos, son incompatibles con la sal, lo cual puede provocar floculación, y después de 10 a 20 minutos de mezclarse pueden causar un rápido aumento en la viscosidad.

IV.4.9 ADITIVOS ESPECIALES PARA CEMENTO.

A) Descontaminadores de lodo.

El paraformaldehído o una aleación de éste y cromato sódico, se emplea a veces para retardar los efectos del cemento de varias sustancias químicas de perforación del lodo, en caso de que la lechada se contamine al mezclarse con el fluido de perforación.

Un descontaminador de lodo, que consiste en una mezcla de 60:40 de paraformaldehído y cromato sódico, neutraliza ciertas sustancias químicas para el tratamiento del lodo. Es efectivo contra taninos, lignitas, almidones, celulosa, lignosulfonato de ferrocroma y lignita de cromo.

B) Polvo de sílice.

El polvo de sílice se emplea principalmente en composiciones de cementación para ayudar a evitar la pérdida de resistencia. Las investigaciones han demostrado, que a medida que las temperaturas exceden los 110 ° C, todos los cementos fabricados pierden mucho de su resistencia a la compresión. Esta pérdida de resistencia, la cual es acompañada por un aumento de permeabilidad, es causada por la formación de un alto silicato de calcio en el cemento fraguado. Al agregar un material de alto porcentaje de agua, tal como la bentonita, acelera la pérdida de resistencia.

El polvo de sílice puede mezclarse en todas las clases de cemento para evitar la pérdida de resistencia que presenta con el tiempo a altas temperaturas. La cantidad óptima de sílice, para controlar la pérdida de resistencia, es del 30 al 40 %. El polvo de sílice (malla 200) posee un requerimiento de agua del 40 % (18 Kg o 18 lt de agua, por cada 15,900 lt de sílice en polvo). Cuando se requieren lechadas de 2.0 a 2.4 gr/cc se emplea con frecuencia sílice con un tamaño de partícula entre (-50 a +150) de malla.

C) Rastreadores radioactivos.

Los rastreadores radioactivos se añaden a las lechadas como marcadores, que pueden ser detectados por medio de registros eléctricos. Pueden emplearse para

determinar la colocación de las cimbras del cemento en cementaciones primarias y para la distribución de una cementación forzada.

D) Teñidores de cemento.

Para identificar un cemento de una clasificación específica o bien, un aditivo mezclado con una composición de cemento, pueden emplearse pequeñas cantidades de teñidor de indicación. No obstante, cuando los teñidores se usan dentro del pozo, la dilución y la contaminación del lodo pueden oscurecer o borrar los colores haciéndoles así que pierdan su efecto.

E) Hidracina.

La hidracina es un aditivo que se usa en cementaciones de tuberías de revestimiento y sirve para tratamiento del lodo por los problemas de corrosión que se presentan. Se necesita una libra de hidracina para remover una libra de oxígeno disuelto.

F) Aditivos de yeso.

Aproximadamente se añade del 4 al 10 % de yeso al cemento portland para lograr:

- a) Rápido fraguado y así combatir la pérdida de circulación.
- b) Consistencia o propiedades tixotrópicas.
- c) Propiedades de expansión en el cemento fraguado.

Si se añade de 30 a 50 % de yeso a cualquier cemento portland producirá un fraguado instantáneo, de 12 a 20 minutos, inclusive cuando la lechada se encuentra en movimiento. Esto se ha realizado con resultados efectivos en trabajos de cementaciones forzadas a baja presión en pozos poco profundos con probable existencia de zonas de pérdida de circulación.

Para formaciones no consolidadas, altamente permeables, agrietadas o cavernosas, un 5 al 10 % de yeso ayudará a obtener una rápida consistencia en estado de reposo.

IV.5 PRUEBAS DE LABORATORIO.

Las pruebas de laboratorio efectuadas a una determinada mezcla de cemento, se realizan tratando de encontrar la concentración óptima de cada uno de los aditivos requeridos conforme a las normas API. sin alterar las condiciones ideales de viscosidad de la lechada y la compatibilidad de los retardadores de fraguado con otros aditivos como son: Reductor de pérdida de fluido, reductor de pérdida de presión por fricción, antiespumantes, y otros que dependen de las condiciones de temperatura y presión a las cuales vaya a ser sometida la lechada.

La norma API. R.P. 10 B delinea las prácticas recomendadas para las pruebas de laboratorio que se llevan a cabo con las lechadas de cemento para pozos de petróleo así como sus aditivos. Estas pruebas se describen a continuación:

1. Determinación del contenido de agua de la lechada.
2. Determinación de la densidad.
3. Pruebas de resistencia a la compresión.
4. Determinación del tiempo de bombeabilidad.

5. Determinación del filtrado.
6. Pruebas de permeabilidad.
7. Determinación de las propiedades reológicas.

IV.5.1 DETERMINACION DEL CONTENIDO DE AGUA.

a) Agua libre.

Una vez que se ha preparado la lechada en el mezclador se le agita en un consistómetro a presión atmosférica, se le vuelve a pasar por el mezclador y luego se le deja en un cilindro de vidrio graduado de 250 ml., perfectamente tapado para evitar la evaporación. Al cabo de 2 horas de reposo se habrá acumulado agua en la parte superior del recipiente. Ese volumen de agua, expresado en mililitros, es el contenido de agua libre de la lechada de cemento.

b) Agua normal.

El contenido de agua normal de una lechada de cemento es lo que cede una lechada que tiene 11 unidades de consistencia, luego de haber sido agitada durante 20 minutos, a 27 °C de temperatura en un consistómetro a presión atmosférica.

c) Agua mínima.

El contenido mínimo de agua de una lechada, es aquel que logra una consistencia de 30 minutos, luego de haber sido agitada durante 20 minutos en un consistómetro a presión atmosférica y 27 °C de temperatura.

IV.5.2 DENSIDAD DE LA LECHADA.

Se utiliza una balanza para lodos que puede ser presurizada o no. En el laboratorio se pondrá cuidado especial en eliminar todo el aire contenido en la muestra de cemento.

IV.5.3 PRUEBAS DE RESISTENCIA.

Se vierte la lechada de cemento en estudio en una serie de moldes, cubos de 5 cm. de lado y se le coloca en un baño de agua corriente a la temperatura requerida por la prueba.

Estos moldes pueden ser:

1. Un recipiente a presión atmosférica para muestras a temperatura hasta de 82 ° C.
2. Un recipiente presurizable para muestras a temperaturas hasta de 193 ° C y presiones hasta de 210 Kg/cm².

El recipiente presurizable es muy superior al de presión atmosférica, ya que permite simular las condiciones del pozo más aproximadas durante el ensayo.

Los tiempos recomendados para sacar las muestras del baño son: 8, 12, 18, 24, 36, 48 y 72 horas. Por lo general las pruebas a las 8, 24, 48 y 72 horas son suficientes, aunque a veces se necesita más información para los tiempos de espera de fraguado u otros datos.

Una vez que se retiran los cubos del baño, se les coloca inmediatamente en una prensa hidráulica que incrementa la carga entre 70 y 280 Kg/cm² por minuto. Cuando se rompe el cubo se lee la máxima presión obtenida en la escala y éste será el valor de la resistencia a la compresión. Se deberá repetir la operación con varias muestras y luego sacar el promedio.

IV.5.4 TIEMPO DE BOMBEABILIDAD.

Tal vez sea ésta la prueba de laboratorio más usada en el campo. Determina cuanto tiempo la lechada permanece en estado fluido (y por consiguiente bombeable) bajo una serie de condiciones dadas en el laboratorio (presión y temperatura).

El aparato que se usa para determinar el tiempo de bombeabilidad es el consistómetro, que puede ser atmosférico o presurizable (Figura 21).

Este último tal vez sea el aparato más caro en un laboratorio de cemento, pero es necesario a fin de poder simular las condiciones del pozo.

El recipiente con la lechada a probar gira a velocidad constante (movido por un motor eléctrico) dentro de un baño de aceite a través del cual se le aplica la temperatura y la presión deseada. Dentro del recipiente aislado hay una paleta conectada a un resorte. A medida que la lechada gira, trata de arrastrar la paleta en el sentido de la corriente. Una lechada mas viscosa ejercerá una fuerza mayor en la paleta, lo cual a su vez transmitirá mayor torque al resorte y esto se mide por medio de un potenciómetro del que está dotado el aparato.

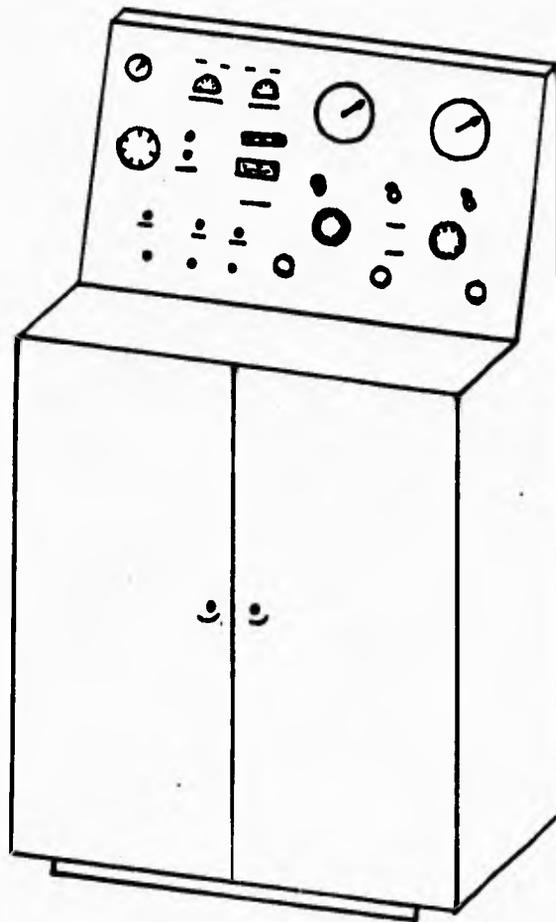


FIGURA 21. CONSISTOMETRO PAN-AMERICAN

El consistómetro está calibrado para poder leer directamente las unidades Bearden de consistencia (Bc). Cuando la lechada alcanza 100 unidades se torna imbombeable. Así, el tiempo de bombeabilidad reportado por el laboratorio será el transcurrido desde que se introduce la mezcla en el consistómetro hasta que el aparato marca 100 Bc. La presión y temperatura aplicada son aquéllas que indica la norma API. RP 10 B. Especifica la forma en que se debe desarrollar la prueba y que corresponderá a las condiciones aproximadas que se tendrán en el campo cuando se cimente a una determinada profundidad.

Los programas están especificados separadamente para cementaciones primarias, liners y cementaciones a presión.

El procedimiento consiste en preparar la lechada a probar, colocándola en su lugar en el consistómetro, aplicar presión y temperatura de acuerdo a lo que especifiquen las cédulas y obtener en el aparato la gráfica de la variación de la viscosidad de la lechada en función del tiempo.

Al finalizar la prueba la lechada debe de eliminarse de inmediato sacándola del instrumento antes de que frague por completo, ya que de no hacerse así podría dañarse el aparato.

La gráfica tiene marcada en el eje de las abscisas el voltaje que va de 0 a 15 volts, con divisiones de 2.5 volts y en el eje de las ordenadas el tiempo en horas, con divisiones de 10 minutos (Figura 22).

En el margen izquierdo del eje de las ordenadas, están marcados los períodos de tiempo en los cuales la lechada permanece estática.

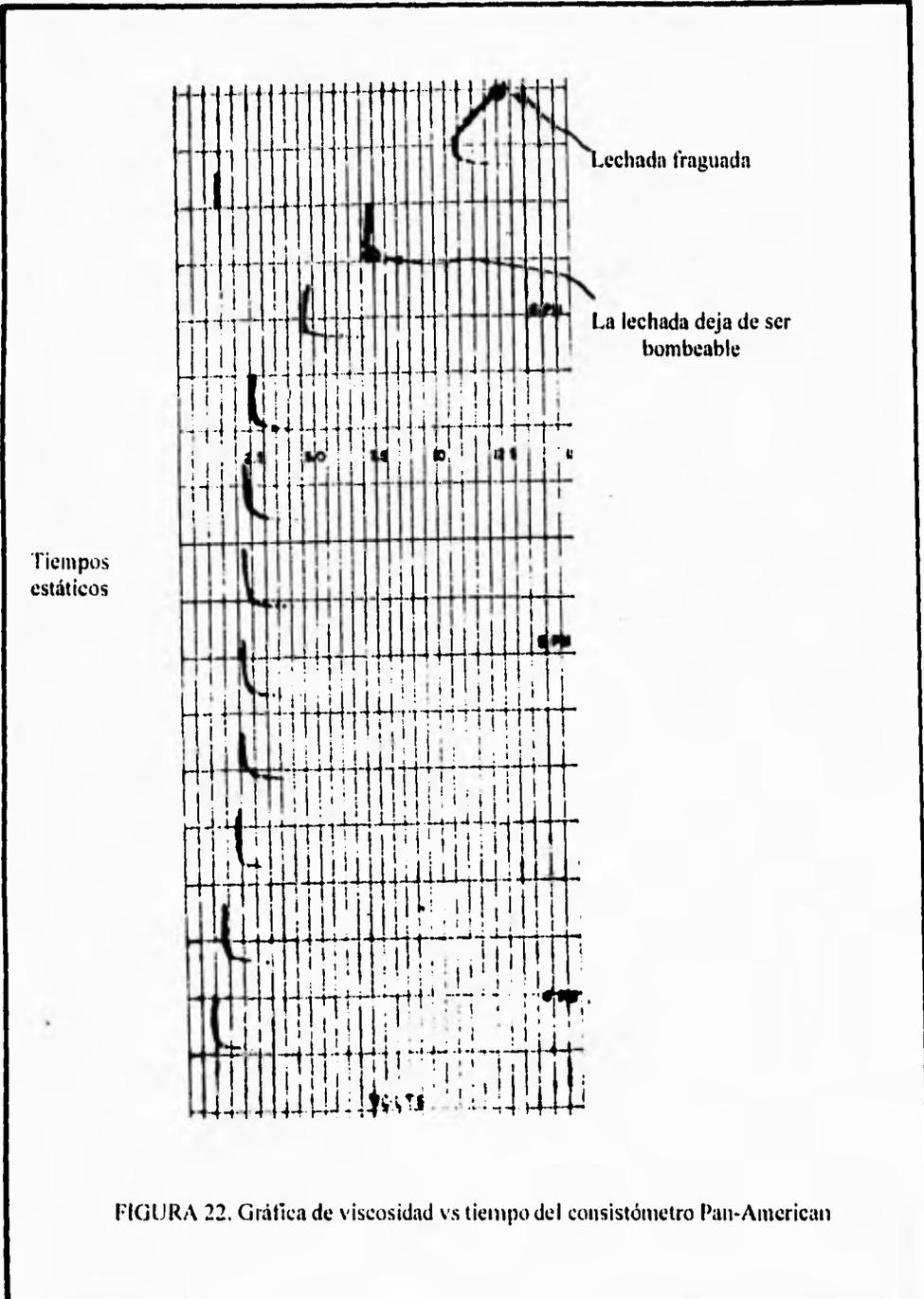


FIGURA 22. Gráfica de viscosidad vs tiempo del consistómetro Pan-American

La gráfica va mostrando a partir del origen como va aumentando la viscosidad o sea el fraguado de la lechada.

Cuando la gráfica alcanza 8.8 volts, la lechada deja ser bombeable, y convirtiendo a UC (unidades que sustituyen al poisse) por medio de una tabla de equivalencia, se obtiene que a este voltaje corresponden 70 UC.

El fraguado de la lechada se tiene en el punto en donde la gráfica alcanza los 12 volts y equivale a 100 UC.

IV.5.5 DETERMINACION DEL FILTRADO.

Aparatos:

Balanzas para medir las cantidades exactas de cemento y aditivos sólidos.

Recipientes de vidrio graduados para medir las volúmenes exactos de agua y aditivos líquidos.

Mezclador, similar a una batidora de cocina.

Filtro prensa para alta o baja presión.

Medio de presión:

Aire comprimido, nitrógeno o CO₂.

Filtro No. 325 (45 micrones) de la U. S. Standard Sieve Screen.

Deberá estar sostenido por una malla fuerte para soportar la presión diferencial.

Cilindro graduado para medir el volumen de filtrado.

Una vez que se ha mezclado la lechada correctamente, se le vierte en el filtro prensa, se le tapa y aplica presión.

Filtrado de baja presión: Se aplica presión de 7 kg/cm^2 , y se va leyendo la cantidad de líquido que cae en el cilindro graduado a los 1/4, 1/2, 1, 2 y 5 minutos de iniciada la prueba y luego a intervalos de 5 minutos. Si la muestra se deshidrata totalmente antes de media hora, se registra el tiempo en que tardó en hacerlo, el filtrado se reporta en cc/30 minutos a 7 kg/cm^2 .

Filtrado de alta presión: La presión aplicada será de 70 kg/cm^2 , y las lecturas se efectuarán de la misma manera. Si la muestra se deshidrata antes de los 30 minutos se extrapola para reportar en cc/30 min. Así durante el ensayo para la determinación del filtrado se supone que hay más lechada presente que lo que realmente se tiene en el recipiente, que por otro lado es lo que sucede en el pozo.

El filtro prensa de alta presión incorpora también un daño a una temperatura controlable a fin de simular las condiciones reales. La temperatura a la cual se hizo la prueba deberá estar registrada en el reporte.

Debido a esta ventaja, el filtro de alta presión se utiliza más que el de baja y los resultados obtenidos son expresados como cc/30 minutos a una presión de 1000 lb/pg^2 .

IV.5.6 PERMEABILIDAD.

Se utiliza un aparato llamado permeámetro que mide la permeabilidad de las muestras de cemento fraguado, de acuerdo a la ley de Darcy.

V.5.7 PROPIEDADES REOLOGICAS.

El viscosímetro de Fann es un aparato de tipo rotatorio movido por un rotor sincronizado a dos velocidades diferentes, que permite obtener velocidades de 3, 6, 100, 200, 300 y 600 rpm (Figura 23).

Un cilindro exterior o rotor, gira a una velocidad constante para cada ajuste de r.p.m., que es transmitido a la lechada de cemento que lo rodea y ésta, a su vez, produce un cierto torque en el cilindro interior sobre el que actúa un resorte. La torsión que adquiere el resorte puede relacionársela con la viscosidad de la lechada y medirla de esta manera. Las lecturas obtenidas se emplean para la determinación de las propiedades reológicas (n' y k') que son de fundamental importancia para el cálculo de caudales críticos y determinados del régimen de desplazamiento (turbulento o tapón) de las cementaciones.

n' = Índice de comportamiento., k' = Índice de consistencia.

Las pruebas que se han visto están determinadas por la norma API. RP 10 B, pero a veces se necesita información específica para un cemento en especial o para una lechada en particular. En esos casos se hacen pruebas para determinar compresibilidades del cemento y del espaciador con el lodo, análisis de agua, granulometría, etc.

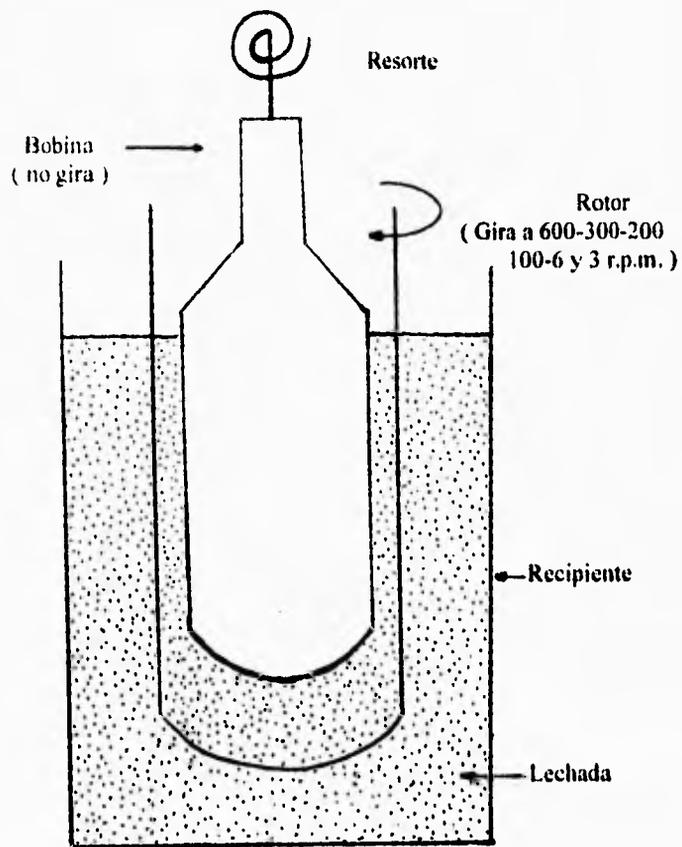


FIGURA 23. VISCOSIMETRO FANN (Esquemático)

CAPITULO V

PROGRAMA DE CALCULO DE UNA CEMENTACION FORZADA

Con los datos que a continuación se presentan, se realizó una cementación forzada como parte del programa de una reparación mayor efectuada a un pozo petrolero del distrito de Ciudad Pemex, Tabasco.

V.1 OBJETIVO DE LA OPERACION.

Obturar el intervalo 1019-1022 metros correspondiente a las arenas Z-13, bloque XII, por encontrarse invadido de agua salada y abrir a producción el intervalo 782-802 metros de la arena Z-6 bloque VI.

V.2 INTERVALO A CEMENTAR.

El intervalo por cementar es de 3 metros según el programa y corresponde de 1019 a 1022 metros.

V.3 DATOS DEL POZO.

T.R. 9^{5/8} pg, J-55, 40 lb/pie de 0.0 a 399 metros.

T.R. 6^{5/8} pg, J-55, 24 lb/pie de 0.0 a 1082 metros.

P.I. 5110 lb/pg² = 359 Kg/cm².

P.C. 4560 lb/pg² = 321 Kg/cm².

T.P. 2^{3/8} pg, N-80, 4.7 lb/pie.

$$P.I. \ 11200 \text{ lb/pg}^2 = 788 \text{ Kg/cm}^2.$$

$$P.C \ 11780 \text{ lb/pg}^2 = 828 \text{ Kg/cm}^2.$$

Profundidad del cementador RTTS a 990 metros.

Densidad del fluido de control es 1.20 (gr/cc).

Factor de seguridad es 10 (adimensional).

Densidad de la terminación es 1.20 (gr/cc).

Densidad en la perforación es 1.40 (gr/cc).

Profundidad media de los disparos es 1020.5 metros.

Resistencia a la presión interna de la T.R. 359 Kg/cm².

Presión al colapso de la T.R. 321 Kg/cm².

V.4. CALCULO DE LAS PRESIONES MAXIMAS PERMISIBLES.

Desde el punto de vista mecánico se pueden alcanzar presiones en la T.P. como en la T.R. de las cuales a continuación se calculan.

a) Cálculo de la presión hidrostática a la profundidad donde se encuentra el RTTS.

$$Ph = \rho_1 * D / 10 \quad (1)$$

Donde:

Ph, Presión hidrostática (Kg/cm²).

ρ_1 , Densidad del fluido de control (gr/cc).

D, Profundidad metros.

ESTADO MECANICO DEL POZO

COLUMNA GEOLOGICA

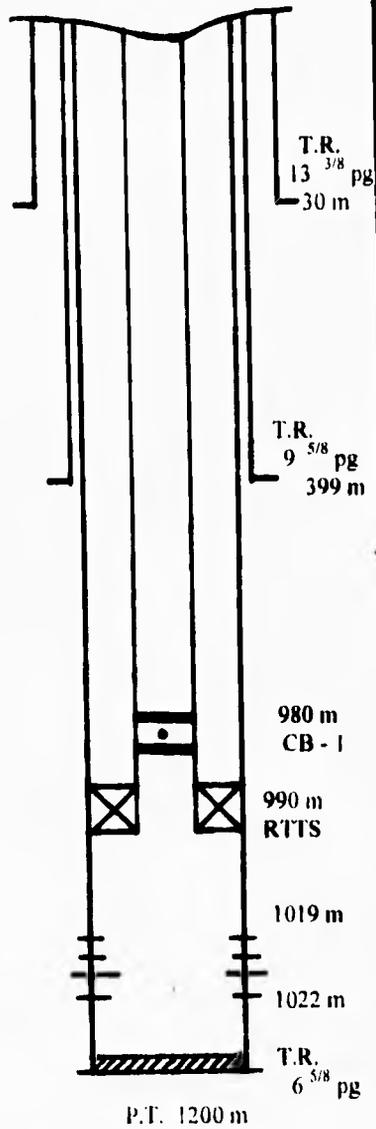
CONTACTO	PROFUNDIDAD (m. B. M. R.)
Belén	Aflora
Zargazal	626
Encajonado	1131
Profundidad total	1200

Lodos UTILIZADOS

PROFUNDIDAD (m)	DENSIDAD (gr/cc)
0.0 - 30.0	1.05
30 - 400	1.10
400 - 1200	1.40

Base sódico bentonítico

TEMPERATURA	FONDO
1200 (m)	63.3 °C
800 (m)	51.5 °C



Sustituyendo los datos en la ecuación (1).

$$P_h = 1.20 \cdot 990 / 10 = 119 \text{ Kg/cm}^2 = 1700 \text{ lb/pg}^2.$$

b) Presión máxima en la tubería de revestimiento.

$$P.m.T.R. = (P.I.T.R./F.seg) - (D.m.d. \cdot (\rho_1 - \rho_2) / 10) \quad (2)$$

Donde:

P.m.T.R. , Presión máxima en T.R. (Kg/cm^2).

P.I.T.R. , Resistencia a la presión interna de la T.R. (Kg/cm^2).

D.m.d. , Profundidad media de los disparos (metros).

ρ_1 , Densidad en la terminación (gr/cc).

ρ_2 , Densidad en la perforación (gr/cc).

F. seg. , Factor de seguridad (adimensional)

Sustituyendo los datos en la ecuación (2).

$$P.m.T.R. = 359 / 1.75 - 1020.5 (1.20 - 1.40) / 10 = 225 \text{ Kg/cm}^2.$$

$$P.m.T.R. = 225 \text{ Kg/cm}^2 = \text{lb/pg}^2.$$

c) Cálculo de la presión máxima en la tubería de producción.

$$P.m.T.P. = P.a.a.c. + (P.c.T.R. / 1.125) - ((\rho_f \cdot D_c) / 10) \quad (3)$$

Donde:

P.m.T.P., Presión máxima en la tubería de producción (Kg/cm^2).

P.a.a.c., Presión aplicada arriba del cementador (Kg/cm^2).

P.c.T.R., Presión al colapso de la T.R. (Kg/cm^2).

ρ_f , Densidad del fluido (gr/cc).

Dc, Profundidad del cementador en metros.

1.125, Factor de seguridad al colapso.

$$P.a.a.c. = P.m.T.R. + (\rho_f \times Dc) / 10 \quad (4)$$

$$P.a.a.c. = 225 + (1.20 \times 990) / 10 = 344 \text{ Kg/cm}^2 = 4891 \text{ lb/pg}^2$$

sustituyendo valores en la ecuación (3).

$$P.m.T.P. = 344 + (321 / 1.125) + (1.54 \times 990) / 10 = 6783 \text{ lb/pg}^2$$

$$P.m.T.P. = 344 + 285 + 152 = 6783 \text{ lb/pg}^2$$

d) Cálculo de la presión de fractura.

Con los datos de densidad de lodo y la profundidad de 990 metros y por gráfica de gradiente de fractura, se encuentra un valor de gradiente de fractura de 14.20 PPG = 0.73873 $\text{lb/pg}^2/\text{pie}$.

La presión de fractura se calcula con la siguiente expresión:

$$P.F. = G.F. \times D \quad (5)$$

Donde:

P.F. = Presión de fractura (lb/pg²).

G.F. = Gradiente de fractura (lb/pg²/pie).

D = Profundidad en pies.

Sustituyendo:

$$P.F. = 0.73873 \text{ lb/pg}^2/\text{pie} \times 3247 \text{ pies} = 2395.65 \text{ lb/pg}^2$$

$$P.F. = 2395.65 \text{ lb/pg}^2 = 169 \text{ Kg/cm}^2$$

e) Cálculo de la presión superficial sin romper la formación.

$$P. \text{ sup} = P.F. + P.T.P. + P \text{ Disp.} - P_h \quad (6)$$

Donde:

P. sup . Presión superficial (Kg/cm²).

P. T. P., Caída de presión en la T. P. (Kg/cm²).

P. Disp. , Caída de presión en los disparos (Kg/cm²).

P.h. , Presión hidrostática (Kg/cm²).

P.F. , Presión de fractura (Kg/cm²).

Sustituyendo los valores en la ecuación (6) se tiene:

$$P. \text{ sup.} = 169 - 119 = 50 \text{ Kg/cm}^2 = 711 \text{ lb/pg}^2.$$

V.5. CALCULO DE VOLUMENES.

A) Datos de laboratorio de la lechada.

Densidad de la lechada	1.85 gr/cc.
Rendimiento de la lechada	30 l/saco.
Cantidad de agua	22 l/saco.
Tiempo bombeable	2:42 horas.
Aditivos	0.40 % HALAD-9

B) Cantidad de cemento a utilizar.

$$5 \text{ toneladas} = 5000 \text{ Kg.}$$

C) Cálculo del número de sacos.

$$5000/50 = 100 \text{ sacos}$$

D) Cálculo del volumen de la lechada.

$$100 \times 38 = 3800 \text{ l} = 24 \text{ bl.}$$

E) Cálculo de la cantidad de agua requerida.

$$100 \times 22 = 2200 \text{ l} = 14 \text{ bl.}$$

F) Cálculo de la capacidad de la tubería de producción.

$$990 \times 2.02 = 2000 \text{ l} = 12 \text{ bl.}$$

V.6. PROGRAMA OPERATIVO.

1. Con la herramienta desanclada se estableció circulación con el mismo fluido de control, verificando la densidad de entrada como la de salida de 1.20 gr/cc. observando la presión de circulación.
2. Se probaron líneas superficiales con 5000 Lb/pg² (350 Kg/cm²).
3. Se ancló la herramienta y se probó efectividad de empaques de la misma observándose satisfactoriamente.
4. Se efectuó prueba de admisión al intervalo por cementar, con los siguientes resultados:

Presión de admisión	126 Kg/cm ² .
Presión máxima de inyección	154 Kg/cm ² .
Presión final	77 Kg/cm ² .
Gasto	0.5 bl/min.
Volumen bombeado	1.5 m ³ .
Volumen regresado	2 bl = 318 l.

5. Se abrió válvula de circulación de la herramienta.
6. Se bombeó bache de agua dulce 3 bl (477 l).
7. Se bombeó lechada de cemento 9 bl (1426 l).
8. Se cerró válvula de circulación del RTTS.
9. Continuó bombeando lentamente lechada de cemento 15 bl (2374 l).
10. Se bombeó segundo bache de agua dulce de 5 bl (795 l).
11. Volumen inyectado mediante la técnica de baja presión y con periodos de bombeo intermitente (24 bl de lechada + 5 bl de agua dulce).

Anotándose las siguientes presiones:

Presión máxima de inyección	233 Kg/cm ² .
Presión final	224 Kg/cm ² .
Gasto	0.5 bl/min.

12. Se descargó presión a cero Kg/cm². Regresando 2 bl. de lodo.
13. Se desancló RTTS y circuló en inversa regresando 1 bl. de lechada de cemento.
14. Se esperó tiempo de fraguado y checó cima de cemento a 988 m.

CONCLUSIONES

- Las razones más comunes para aplicar una cementación forzada son el abandono, el control de gas y la entrada de agua en un pozo.
- La cementación forzada es uno de los tipos de reparaciones más complejas y depende de un buen planteamiento anterior a la operación, tomando en cuenta las condiciones en que se desarrollará la operación.
- La programación, instalación y prueba de líneas superficiales es de suma importancia para las diferentes operaciones que se llevan a cabo.
- El método de Branden-Head original para forzar un cemento que penetra a un intervalo se realiza a través de la T.P. sin el uso de empaque, una de las restricciones es que no hay manera de impedir el flujo regresivo de cemento, excepto mantener una presión mientras se espera que el cemento frague.
- Existe un método más aplicable, para determinadas operaciones utilizando una herramienta ya sea recuperable o no, ya que este método confina la presión en un punto específico en el pozo.
- La técnica a alta presión implica el fracturamiento de la formación, inicialmente utilizando una cantidad de agua salada para determinar la presión de ruptura de la formación a ser forzada.
- La técnica de baja presión, ha sido la más eficiente para cementaciones forzadas, alcanzando un desarrollo en el cemento de control, filtrado y herramientas recuperables, ya que con esta técnica se evita romper la formación.
- La composición del cemento se diseña regularmente para condiciones variables de presión y temperatura: esto ha sido posible a través del desarrollo de aditivos que modifiquen los cementos disponibles para requerimientos individuales.

- El tiempo de fraguado y la resistencia del cemento son afectados por diversos factores, como: relación agua-cemento, efecto de la contaminación con agua salada, contaminación con lodo, contaminación con gas y/o aceite, influencia de la presión y temperatura, tipo de cemento y control de filtrado.

BIBLIOGRAFIA.

1. CEMENTING
DWIGHT K. SMITH.
MONOGRAPH VOLUME 4 OF THE HENRY L. DOHERTY SERIES.
1976.
2. CEMENTIG HANDBOOK
GEORGE O. SUMAN, JR. Y RICHARD C. ELLIS.
WORLD OIL'S. 1977.
3. COMPOSITION AND PROPIERTIES OF OIL WELL DRILLING
FLUIDS G. GRAY, H DARLEY AND W. ROGERS.
FOURTH EDITION. 1978
4. PROCEDIMIENTOS DE OPERACION PARA INGENIERIA PETROLERA
SECCION INGENIERIA COSTOS Y ESTADISTICAS
PETROLEOS MEXICANOS, OCT/1986.
5. ESTUDIO DE TECNICAS PARA CEMENTACIONES PRIMARIAS
INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO. 1987
6. PROGRAMA WEATHERFORD DE CEMENTACION.
WEATHERFORD CO. 1987
7. CEMENTACIONES A PRESION
PETROLEOS MEXICANOS. 1987

8. CEMENTACIONES A PRESION UTILIZANDO CEMENTOS DE BAJA PERDIDA DE AGUA.
CATALOGO CEPISA (CEMENTACION Y ESTIMULACION DE POZO S.A.).
1985

9. CEMENTACIONES A PRESION USANDO CEMENTO CON ADITIVO DE BAJA PERDIDA DE AGUA.
CIA. CEPISA. 1987
ING. JAVAL TEJADA ARIAS.

10. DATOS ESTADISTICOS
DEPTO. INGENIERIA PETROLERA
DISTRITO CD. PEMEX, TAB. 1988

11. CATALOGO HALLIBURTON 1980-1981

12. CATALOGO BAKER 1980-1981

13. CATALOGO DOWELL-SCHLUMBERGER 1980-1981

14. PROCEDIMIENTO SEMI-AUTOMATICO PARA EL CALCULO DE GEOPRESIONES Y GRADIENTES DE FRACTURA.
ING. NESTOR MARTINEZ ROMERO.
M. I. RAUL LEON VENTURA.
IMP - 1982